

**2016**

**Trabajo de  
Fin de Grado**



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

# **ESTUDIOS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

---

**Autora: Miriam Martínez Villalba  
Grado en Ingeniería Eléctrica**

**Tutor: Juan Carlos Burgos Díaz  
Departamento de Ingeniería Eléctrica**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Hoy día 21 de Junio de 2016 me dispongo a cerrar una de las mejores etapas de mi vida en la que además de crecer académica y profesionalmente he crecido como persona.*

*Recuerdo todavía los nervios del primer día, los primeros pasos por la Universidad, las palabras titubeantes, las primeras clases, los primeros exámenes como si hubiesen sido ayer, y es que no puedo creerme que estos cuatro años hayan pasado tan rápidos.*

*No puedo sentirme tampoco más orgullosa y emocionada de lo que me encuentro ahora mismo de ver cómo pongo fin a estos duros años de esfuerzos pero también de logros, superaciones y recompensas para convertirme en una joven ingeniera.*

*“Joven ingeniera” uno de mis sueños favoritos. Me faltarían días de vida para agradecer a mis padres todo lo que han hecho por mí. Por sacrificarse tanto y por haberme dado todo lo que han podido y más para que yo haya tenido la oportunidad de formarme como lo he hecho y hoy haber llegado hasta aquí. Os agradezco haberme enseñado que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se consigue. Pero sobretodo miles de gracias por vuestro amor, apoyo y cariño que aunque está ahí siempre, parece que solo se hace visible en los momentos difíciles. Os quiero y os querré siempre y espero que todos mis éxitos sean también los vuestros. Encontrarme en este punto no supone haber superado únicamente estos cuatros años de grado, hay mucho más. Y sino que se lo pregunten en especial a quién más me ha soportado y ayudado a lo largo de mi vida. Mamá te agradezco que me hagas ver la vida cada día de una forma diferente y que confíes en mis decisiones. Madre sólo hay una y a mí me ha tocado la mejor. Es también otro sueño cumplido poder empezar a parecerme un poquito más a la persona que más admiro, mi padre. Gracias papá por tu apoyo, tu dedicación y esmero. Por ayudarme tantas veces y por haber sido uno de los pilares fundamentales para que hoy yo pueda estar optando a este sueño, el cual también fue un día el tuyo.*

*Agradecérselo también a mi pequeño Jandri, quién me anima y apoya sin apenas darse cuenta, con su todo su cariño y aunque parezca que no, también sus bromas. Y si como dices ahora, éste es el camino que quieres seguir, te animo a ello porque es maravilloso. Te apoyaré siempre en todo, como tú haces conmigo.*

*Ha sido un camino difícil, que a veces se ve muy largo pero por el cual te vas encontrando a personas increíbles que te acompañan hasta el final. Y es aquí donde nombro a mis compañeros y muchos de ellos también amigos. Quiénes han llorado conmigo los fracasos pero también quiénes han celebrado todas mis superaciones y victorias. Y hablo tanto de los compañeros que entraron conmigo, de los que se han ido, como de los que conocí a mitad de este camino, pues cada uno de ellos forma parte de esta historia. Compañeros os digo: “Fue un placer compartir todos estos momentos con vosotros y ojalá algún día podamos encontrarnos desempeñando esta profesión que todos hemos elegido”.*

*Y os destaco Jose Ángel Simón y Roberto Prado, “mis rumbis”, por ser sin duda quienes más desinteresadamente me habéis ayudado y porque habéis estado ahí cuando más lo he necesitado. Porque sin vosotros esto sí que no hubiese sido lo mismo. Aunque ya acaba esta*

*etapa para nosotros, estoy segura de que nuestra amistad será para siempre, porque así me lo habéis demostrado. Gracias por compartir cada día conmigo, por las tantas horas de clases, estudio y exámenes, por los grandes momentos de laboratorios, y por las tardes de bares en Leganés (todo lo demás lo dejo entre nosotros). Gracias también por vuestra ayuda y apoyo, en este tema y en todos los que habéis estado. Por vuestros consejos y en definitiva por estar siempre ahí. Y si ocurriese que ahora nos separasen unos cuantos kilómetros espero que vosotros no tengáis miedo, como no lo tengo yo, de perderme; porque sé que al igual que vosotros me tendréis, yo os tendré siempre. Gracias, gracias y gracias otra vez por todo. Sin duda este trabajo es también parte vuestra.*

*Y aunque son ellos, mis padres, mi hermano y compi-amigos los que más me han acompañado no quiero olvidarme de muchas otras personas que también forman parte de esta historia.*

*Hablo primero de mi familia, que aunque está lejos siempre está conmigo. Gracias por vuestro apoyo. Me gustaría también dedicarle un trocito de este esfuerzo a mi tita M<sup>a</sup> Ángeles. Porque tú mejor que nadie sabes que cuando las cosas se ponen difíciles se sacan fuerzas de donde no las hay para seguir adelante. Eres y serás siempre uno de mis ejemplos a seguir de superación y valentía.*

*Gracias a mis amigos, por estar siempre a mi lado. A los amigos de siempre, a los amigos que están cerca, a los que están lejos y a esa persona que llega un día y te lo cambia todo. Porque con vosotros he pasado los mejores años de mi vida y espero seguir viviendo tantos que podamos superar los que ya hemos vivido.*

*Te lo agradezco a ti Lucía por ser mi amiga confidente. Porque contigo aprendí que no hay distancia que esté lejos y que las amistades verdaderas lo pueden todo. Gracias por escucharme siempre, por aguantarme y sobre todo por tantos buenos momentos. Por todos esos viajes y locuras que tú bien sabes y que tanto me han ayudado a desconectar de la dura rutina. Otro trocito de este trabajo te lo debo a ti.*

*Y por último quiero agradecer este trabajo a mi Universidad Carlos III de Madrid por haberme dado la oportunidad de poder iniciar este sueño. Al departamento de Ingeniería Eléctrica, a todos mis profesores y en especial a mi tutor Juan Carlos Burgos. Por su dedicación y profesionalidad, porque sin tu ayuda no hubiese sido posible realizar este proyecto.*

# *Índice*

---

<b>Capítulo 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
1.2 ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO DE LOS PROYECTOS DE TRANSMISIÓN .....	9
1.3 MARCO REGULADOR .....	11
1.4 OBJETO DE ESTUDIO .....	12
<b>Capítulo 2: PROPAGACIÓN DE ONDAS DE LÍNEAS LARGAS .....</b>	<b>14</b>
2.1 ECUACIÓN DE UNA LÍNEA LARGA .....	15
2.2 REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE ONDAS.....	18
2.3 EFECTOS DE LA TERMINACIÓN DE LA LÍNEA.....	20
2.3.1 Tensión aplicada a una línea alimentada por una fuente real .....	21
2.3.2 Línea de extremo abierto .....	21
2.3.3 Línea terminada por un cable .....	22
2.3.4 Extremo de línea cortocircuitado .....	23
<b>Capítulo 3: PARARRAYOS .....</b>	<b>24</b>
3.1 MISIÓN DEL PARARRAYOS .....	25
3.1.1 Colocación del pararrayos.....	27
3.1.2 Distancia entre el pararrayos y el equipo a proteger .....	28
3.2 TIPOS DE PARARRAYOS.....	29
3.3 CURVAS DE ACTUACIÓN .....	30
3.4 SELECCIÓN .....	31
<b>Capítulo 4: MODELACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS MEDIANTE ATPDRAW .....</b>	<b>35</b>
4.1 ¿QUÉ ES ATP? .....	36
4.2 MÓDULOS MÁS IMPORTANTES .....	36
4.3 MÓDULOS EMPLEADOS .....	38
4.3.1 Módulos de línea de transmisión empleados .....	38
4.3.2 Módulos de tipos de interruptores empleados.....	39
4.3.3 Módulos de tipos de fuentes empleados .....	39
4.3.4. Módulos de tipos de transformador empleados .....	42
4.3.5. Módulos de tipo de pararrayos empleado .....	44
4.3.6. Otros tipos de modelos.....	46

<b>Capítulo 5: SIMULACIONES REALIZADAS .....</b>	<b>47</b>
5.1 SIMULACIONES REALIZADAS .....	48
5.2 MODELO DE ENERGIZACIÓN DE UNA LÍNEA LARGA EN VACÍO .....	48
5.2.1 <i>Modelo de energización de una línea larga en vacío con fuente de corriente continua</i> .....	48
5.2.2 <i>Modelo de energización de una línea larga en vacío con fuente de corriente alterna</i> .....	50
5.3 MODELO DE ENERGIZACIÓN DE UNA LÍNEA LARGA TRIFÁSICA CON TRANSFORMADOR TRIFÁSICO AL FINAL DE LA LÍNEA .....	51
5.4 MODELO DE PARARRAYOS.....	53
5.4.1 <i>Selección del pararrayos</i> .....	53
5.4.2 <i>Simulación de prueba del modelo de pararrayos</i> .....	56
5.5 ESTUDIO DEL SISTEMA ANTE SOBRETENSIONES DE TIPO MANIOBRA .....	56
5.6 ONDA TIPO RAYO .....	57
5.7 ESTUDIO DE SOBRETENSIONES ATMOSFÉRICAS CON DOS MODELOS DE TRANSFORMADOR DISTINTO.....	59
5.7.1 <i>Características comunes de los dos modelos</i> .....	59
5.7.1.1 <i>A) Conexión para la caída del rayo</i> .....	59
5.7.1.2 <i>B) Intervalo de integración</i> .....	60
5.7.2 <i>Modelo 1: Efecto del pararrayos seleccionado en una línea trifásica finalizada por transformador trifásico (BCTTRAN)</i> .....	61
5.7.3 <i>Modelo 2: Efecto del pararrayos seleccionado en una línea trifásica finalizada por transformador híbrido (HYBRID)</i> .....	62
5.8 COMPARACIÓN DE LOS ESTUDIOS ANTERIORES CON DOS MODELOS MÁS SIMPLIFICADOS .....	64
5.8.1 <i>Circuito equivalente I: Línea terminada por capacidades parásitas</i> .....	64
5.8.2 <i>Circuito equivalente II: Línea de terminada en un extremo abierto</i> .....	66
5.9 EFECTO DE LA DISTANCIA DEL PARARRAYOS AL TRANSFORMADOR .....	67
<b>Capítulo 6: RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>69</b>
6.1 RESULTADOS TRAS LA ENERGIZACIÓN DE UNA LÍNEA LARGA EN VACÍO .....	70
6.1.1 <i>Análisis teórico</i> .....	70
6.1.2 <i>Caso de fuente de alimentación en corriente continua</i> .....	73
6.1.3 <i>Caso de fuente de alimentación en corriente alterna</i> .....	79
6.2 RESULTADOS TRAS LA ENERGIZACIÓN DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN FINALIZADA POR TRANSFORMADOR TRIFÁSICO .....	81
6.3 RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL MODELO DE PARARRAYOS DISEÑADO .....	83

6.4 RESULTADOS DEL EFECTO DEL PARARRAYOS ANTE SOBRETENSIONES DE TIPO MANIOBRA.....	84
6.5 RESULTADOS DEL DIMENSIONADO DEL RAYO .....	88
6.6 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA SELECCIÓN DEL MODELO MÁS ADECUADO DE TRANSFORMADOR ANTE SOBRETENSIONES DE ORIGEN ATMOSFÉRICO.....	89
6.6.1 Respuesta del sistema utilizando el modelo BCTRAN.....	90
6.6.2 Respuesta del sistema utilizando el modelo HYBRID.....	93
6.7 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON OTROS MODELOS SIMPLIFICADOS .....	96
6.7.1 Simulación de un circuito compuesto sólo por capacidades .....	96
6.7.2 Simulación de una línea terminada en un extremo abierto .....	99
6.7.3 Conclusión de los resultados obtenidos.....	101
6.8 RESULTADOS DEL EFECTO DE LA DISTANCIA DEL PARARRAYOS AL TRANSFORMADOR.....	103
6.9 CONCLUSIONES GRÁFICAS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN ESTE CAPÍTULO .....	107
<b>Capítulo 7: PRESUPUESTO.....</b>	<b>111</b>
7.1 PRESUPUESTO PARA UN ESTUDIO DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS ....	112
<b>Capítulo 8: CONCLUSIONES .....</b>	<b>114</b>
8.1 RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO .....	115
8.2 CONCLUSIONES.....	116
8.3 SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.....	118
8.4 CONCLUSIONES PERSONALES .....	119
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXO: Reporte de soluciones de ATP-EMTP .....</b>	<b>123</b>

# *Capítulo 1*

## INTRODUCCIÓN

---



## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG), que se enmarca en el contexto de la Coordinación de Aislamiento de líneas de Alta Tensión, tiene por objeto el estudio de los transitorios electromagnéticos en una línea de transmisión eléctrica.

El cálculo de las sobretensiones representativas en la red eléctrica es un paso fundamental para cualquier estudio de coordinación de aislamiento. Aunque las redes funcionen la mayoría del tiempo en régimen permanente, las solicitaciones que ocurren durante proceso transitorios son las que servirán para seleccionar el nivel de aislamiento normalizado de los equipos.

En este TFG se analizan las sobretensiones tanto de frente lento como de frente rápido. Son sobretensiones de frente lento aquellas que se originan mediante un proceso transitorio causado por una maniobra. Por otro lado, son sobretensiones de frente rápido cuando se originan por un proceso transitorio causado por una descarga atmosférica. A estas últimas se les puede llamar también sobretensiones de origen atmosférico o tipo rayo.

Dada la complejidad que supone un estudio riguroso de sobretensiones transitorias, el cálculo se realiza actualmente de forma computacional. En este Trabajo de Fin de Grado se emplea la herramienta de análisis de simulación de transitorios ATP-EMTP, concretamente la interface de ATPDraw. ATPDraw permite modelar el comportamiento de cada uno de los diferentes elementos que constituyen el sistema eléctrico, así como el fenómeno de impacto del rayo en la línea de transmisión, aportando los resultados obtenidos para un intervalo de tiempo de simulación predefinido. Se conocerán así los valores tanto de sobretensiones como de intensidades en cada uno de los nudos o componentes que definan el sistema y se valorarán dichas soluciones hasta concretar cuál de ellas es la más eficiente para el caso de estudio.

Desde el punto de partida ATP es una herramienta desconocida tanto para mi tutor de este trabajo como para mí, por lo que se parte de un modelo simplificado. Este modelo se irá complicando a medida que se coge agilidad con la herramienta de análisis.

Tras el estudio de modelos simplificados, se realizará un análisis de las sobretensiones que alcanza un transformador ante sobretensiones de tipo maniobra y tipo rayo cuando se encuentra protegido por un pararrayos situado su lado de alta tensión

Se profundizará en mayor medida en las sobretensiones de tipo rayo, realizando simulaciones y análisis con dos modelos de transformados distintos y variando la distancia entre el pararrayos y el elemento protegido.

Además se planteará un modelo simplificado que pueda emplearse para un cálculo manual si no se precisa de la herramienta de ATP en un momento determinado en el cual se quiere realizar dicho estudio.

Los resultados obtenidos se contrarrestarán con los citados por distintos autores, destacando Martínez Velasco, pues para tener una mayor seguridad en la validez de los resultados de las primeras simulaciones se emplean ejemplos propuestos en su libro (Velasco, 2007).

## **1.2 ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO DE LOS PROYECYOS DE TRANSMISIÓN**

El principal objetivo de este apartado es identificar los impactos ambientales, sociales y políticos que se deben aplicar a proyectos de transmisión eléctrica.

El desarrollo de una red de transporte tiene implicaciones sobre los territorios por los que discurre. Este hecho, unido al creciente número de espacios protegidos, conlleva a la existencia de dificultades cada vez mayores para inscribir estas infraestructuras en el territorio. Además, en numerosas ocasiones a esta afectación física sobre el territorio y el patrimonio natural se le suma el rechazo social de la instalación de líneas aéreas próximas a núcleos de población o enclaves habitados.

A diferencia de otras infraestructuras que suelen ser más beneficiosas para los municipios por los que discurren, como son carretera local o red eléctrica de distribución, las infraestructuras de líneas de transmisión presentan mayores riesgos.

En las figuras siguientes se muestra la interacción entre la red eléctrica principal y los espacios naturales protegidos, así como las principales líneas eléctricas de transporte planificadas.

Se puede comprobar en ellas que resulta prácticamente imposible diseñar unos trazados para las nuevas líneas que no atraviesen uno o diversos espacios naturales. De manera análoga, ocurre lo mismo en la superposición de posibles trazados en núcleos de población o enclaves habitados. (Folch, Garrabou, & Ventura, 2012)



**Figura 1.1.** Principales líneas de transporte eléctrico existentes y programadas en el horizonte 2016.

*Fuente: REE*



**Figura 1.2.** Relación de los espacios naturales protegidos con la red actual de líneas de transporte eléctrico en España.

*Fuente: Bases cartográficas del MARM, de REE y otras fuentes.*

Sin embargo no necesariamente esto implica que los impactos potenciales se traduzcan siempre en impactos reales, ni tampoco que no existan alternativas de trazado que minimicen las afectaciones, o medidas complementarias que compensen los impactos previstos.

Como el mayor impacto de las líneas de transmisión de energía eléctrica se produce en los recursos terrestres, se requiere un derecho de vía exclusivo para la línea de transmisión de energía eléctrica. Los sistemas de transmisión incluyen la línea de transmisión, el derecho de vía, las subestaciones, y los caminos de acceso o mantenimiento.

Mientras que los efectos de las líneas cortas son locales, los de las más largas pueden tener efectos regionales. Además, cuánto más larga sea la línea mayores serán los impactos ambientales en los recursos naturales, sociales y culturales. Estos impactos ocurren principalmente sobre y dentro de los derechos de vía. También se aumenta la magnitud e importancia de los impactos a mayor tensión en la línea, necesitando estructuras de soporte y derechos de vía de mayor tamaño y extensión, lo cual hace imprescindible los estudios de sobretensiones en transitorios.

Algunos de los impactos ambientales negativos directos son: daños en la vegetación, fragmentación o alteración de los hábitats, erosión y sedimentación, riesgos para la aviación y peligro para aves o deterioro de los recursos culturales o estéticos debidos a los impactos.

Y algunas de las medidas de mitigación que pueden adoptarse para prevenir dichos impactos serían las siguientes: utilizar técnicas adecuadas de desbroce, orientar el derecho de la vía de modo que se evitan las áreas naturales importantes como áreas protegidas, instalar trampas de sedimento o mallas para controlar la escorrentía y la sedimentación, diseño de rutas seguras evitando trayectorias de vuelo o diseño de rutas donde se eviten las áreas frágiles, incluyendo los sitios turísticos y panorámicos; entre otras. (Dawson, 2013)

### **1.3 MARCO REGULADOR**

La elección de las características que deben reunir los aislamientos de los aparatos e instalaciones de alta tensión exige un conocimiento previo tanto de las solicitaciones dieléctricas a las que van a estar sometidos en servicio como del comportamiento de los diferentes tipos de aislamientos frente a dichas solicitaciones. Este conocimiento es fundamental para realizar una correcta coordinación de los aislamientos que permita conocer en cada caso el riesgo de avería por fallo dieléctrico de dichos aislamientos.

A día de hoy se dispone de medios adecuados para conocer de una manera estadística las solicitaciones dieléctricas que pueden aparecer en las instalaciones de alta tensión. Igualmente, existen medios para analizar el comportamiento de los aislamientos frente a los distintos tipos de sobretensiones, realizando ensayos en laboratorios de alta tensión y simulando dichas sobretensiones mediante formas de onda normalizadas internacionalmente. Este mejor conocimiento de las solicitaciones y del comportamiento de los materiales ha permitido reducir considerablemente los costes del aislamiento de las instalaciones y trabajar con unos riesgos de avería conocidos.

El estudio de sobretensiones y la selección de aislamiento y dispositivos de protección es el objetivo de lo que se conoce como Coordinación de Aislamiento. Una primera aproximación de definir este concepto es hacerlo como la selección de la tensión soportada en los distintos equipos. Puesto que el comportamiento de cualquier aislamiento depende del tipo de solicitud al que es sometido, la definición se puede completar tal y como aconseja la norma UNE-EN-60071-1: “La coordinación de aislamiento es la selección de la rigidez dieléctrica de los equipos en relación con las tensiones que pueden aparecer en el sistema en el cual se hayan instalado, teniendo en cuenta las condiciones ambientales de servicio y las características de los dispositivos de protección disponibles” (NORMA, 2006)

Un procedimiento de coordinación de aislamiento debe tener en cuenta los factores que influyen en la soportabilidad del aislamiento, como son la polaridad de las sobretensiones, la forma de onda de las sobretensiones, el tipo de aislamiento, las condiciones atmosféricas si se trata de aislamiento externo y finalmente el estado físico que pueden llegar a tener los equipos.

El procedimiento propuesto en la norma UNE-EN-60071-2 consiste en seleccionar el nivel de aislamiento normalizado y determinar las distancias en el aire a partir de las tensiones o sobretensiones representativas y de los factores que influyen en la soportabilidad del aislamiento. (NORMA, 1999).

El método de coordinación de aislamiento a aplicar dependerá de la información de la que se disponga sobre las tensiones representativas. Dependiendo de esta información disponible se podrá aplicar uno u otro de los métodos existentes para la coordinación de aislamiento: el método determinista o estadístico.

Fundamentalmente, las sobretensiones causadas por maniobras o descargas atmosféricas que se originan en una red eléctrica de alta tensión, tienen carácter estadístico y se suelen

caracterizar mediante una función de densidad probabilidad. A partir de la distribución estadística de las sobretensiones y de la función de la probabilidad de fallo de aislamiento se puede obtener el riesgo o frecuencia de fallo de un equipo frente a un determinado tipo de sollicitación dieléctrica. De esta forma se podrá seleccionar y dimensionar el aislamiento de forma que la frecuencia de fallo se encuentre dentro de los límites aceptables.

## **1.4 OBJETO DE ESTUDIO**

El objeto de estudio de este proyecto es doble.

En primer lugar el objetivo es utilizar ATP-EMTP para hacer un estudio práctico y un análisis de la influencia de determinados factores en la elección del pararrayos.

Un segundo objetivo es realizar un análisis de la forma en la que se puede simplificar un modelo de línea larga finalizada por un transformador cuando se quiere realizar un estudio más simplificado y por tanto menos riguroso de sobretensiones tipo rayo.

Los objetivos mencionados se pueden descomponer en una serie de pasos u objetivos secundarios.

- Se realizará un análisis de cómo afectan distintos parámetros del sistema eléctrico a las sobretensiones. Se simularán distintos casos donde se varíen parámetros como la resistencia interna de la fuente o la resistencia por unidad de longitud de la línea. Con estos estudios se diseñará el circuito base para simulaciones posteriores, el cual se irá complicando con la inyección del rayo a la línea para el estudio de sobretensiones de origen atmosférico.
- Se realizará una comparativa de las sobretensiones de tipo maniobra que se alcanzan tras la energización de la línea en el transformador, cuando esté se encuentra protegido por pararrayos y cuando no.
- Se comparará el comportamiento de dos modelos distintos de transformador, el trifásico y el híbrido, ante sobretensiones de origen atmosférico. Con los resultados obtenidos en este estudio se perseguirá conseguir el segundo objetivo de este TFG analizando qué circuito simplificado es el válido para la línea de transmisión finalizada por cada uno de los modelos de transformador anteriormente citados.
- Se validará que el transformador híbrido es el idóneo para realizar análisis de origen atmosférico y se estudiará el efecto de la distancia entre el pararrayos y el transformador en las sobretensiones de tipo rayo.

Los resultados obtenidos en este proyecto pueden servir para realizar una práctica en cursos posteriores en la asignatura impartida en tercer curso de “Instalaciones Eléctricas”. Dado que ATP es un estándar aceptado en el mundo empresarial y académico para la simulación digital de fenómenos transitorios de electromagnetismo. Por ser el ATP el programa de análisis de transitorios más utilizado en el mundo dentro del campo de la Ingeniería de Sistemas Eléctricos de Potencia, resulta interesante que futuros alumnos puedan aprenderlo y realizar una práctica de dicha asignatura con este programa. Es de resaltar que en la actualidad las prácticas de transitorios electromagnéticos de la asignatura “Instalaciones eléctricas se realizan con Matlab SimPowerSystems, que es un programa menos utilizado para los cometidos mencionados.

# *Capítulo 2*

## **PROPAGACIÓN DE ONDAS EN LÍNEAS LARGAS**

---

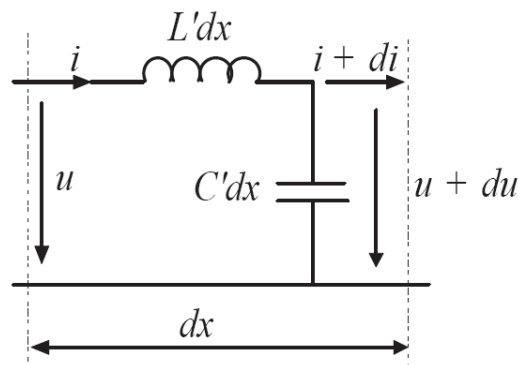
Para que una línea tenga un cierto potencial respecto del terreno es preciso que en la línea haya una carga eléctrica. En último término las cargas eléctricas provienen de la fuente que alimenta la línea. En líneas cortas la energización de la línea es prácticamente instantánea, pero en líneas largas la energización lleva un tiempo no despreciable, ya que según la teoría de la relatividad nada puede ir a más velocidad que la velocidad de la luz.

En éste capítulo se obtienen las ecuaciones de la propagación de una onda de tensión por una línea (apartado 2.1) y los fenómenos de reflexión y refracción de ondas cuando la onda de tensión llega a un punto en el que hay un cambio en la impedancia característica de la línea (apartado 2.2). El capítulo finaliza con unas consideraciones sobre la influencia que tiene la terminación de la línea en la propagación de las ondas (apartado 2.3).

## **2.1 ECUACIÓN DE UNA LÍNEA LARGA**

El estudio de transitorios en líneas de transmisión de parámetros distribuidos es muy complejo y solamente se considerará el caso de una línea monofásica sin pérdidas (Greenwood, 1991), es decir, donde la resistencia de la línea es nula y la resistencia de pérdidas en paralelo con las capacidades es infinita.

La propagación de una onda de tensión por una línea lleva asociada la propagación de una onda de corriente que va energizando la línea a su paso. A medida que la línea se va cargando aparece un campo eléctrico entre la línea y el suelo y a medida que la corriente va atravesando las secciones de la línea se crea un campo magnético. Por eso el modelo de la línea está compuesto por una inductancia en serie y una capacidad en paralelo como se representa en la figura 2.1



**Figura 2.1** Circuito equivalente de una sección elemental de una línea de transmisión

Fuente: (Stevenson, 1965)

Se medirá la distancia  $x$  a lo largo de la línea desde el extremo generador hasta el elemento diferencial de la longitud  $dx$ , mostrado en la figura 2.1.



La caída de tensión a lo largo del elemento diferencial de la línea es:

$$i(R dx) + (L dx) \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.1)$$

Como para valores positivos de  $i$  y  $\frac{\partial i}{\partial t}$  ocurre que  $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$  tiene que ser mayor que  $u$ , es necesario escribir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} dx = - \left( Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \right) dx \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} dx = - \left( Gu + C \frac{\partial u}{\partial t} \right) dx \quad (2.3)$$

Al tratarse de una línea sin pérdidas los valores de  $R$  y  $G$  son nulos y se divide las ecuaciones 2.2 y 2.3 entre  $dx$ , obtenemos:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.5)$$

A partir de estas ecuaciones se puede calcular la llamada “ecuación de la onda viajera” de una línea de transmisión sin pérdidas.

Calculando tanto la derivada parcial de ambos términos de (2.3) respecto a  $x$ ; como la derivada parcial de los términos de (2.4) con respecto a  $t$ :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L' C' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L' C' \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

La solución a las ecuaciones es una onda que derivada dos veces en el espacio tiene que dar lo mismo que al derivarla dos veces en el tiempo, por tanto tendrá que ser una función que dependa de una combinación lineal del espacio y del tiempo. (Stevenson, 1965)

Esto representa una onda que vale lo mismo en un punto del espacio  $x_1$  en un instante de tiempo  $t_1$ , que en otro punto del espacio  $x_2$  en un instante de tiempo  $t_2$ , con lo que se verifica que:  $x_1 - vt_1 = x_2 - vt_2$ , esto es, es una onda viajera que viaja con velocidad constante.

Además, existen unas relaciones entre la derivada de la tensión en el tiempo y la derivada de la corriente en el espacio y viceversa (ecuaciones (2.4) y (2.5)), por eso la expresión matemática de  $i$  no puede estar divorciada de la expresión matemática de  $u$ , si no que deben ser expresiones idénticas. Para que se cumplan simultáneamente las ecuaciones (2.4) y (2.5) es preciso que los términos de la expresión de  $i$  sean los de  $u$  divididos entre una cierta impedancia a la que se llama impedancia característica de la línea,  $Z_c$

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (2.8)$$

Definimos la impedancia característica de una línea de transmisión,  $Z_c$ , como la impedancia equivalente debida a las propiedades características de los conductores que forman la línea. Su unidad de medida es el  $\Omega$ . La aproximación de línea de transmisión sin pérdidas se define por  $R' = 0$  y  $G' = 0$  y considera sólo los efectos de inducción,  $L'$ , y de capacidad,  $C'$ , entre los conductores.

El hecho de que la expresión matemática de la corriente y de la tensión sea la misma significa que el aspecto de las ondas de la intensidad es idéntico al de la tensión. Teniendo en cuenta el signo menos de las ecuaciones (2.4) y (2.5) el cociente  $\frac{u}{i}$  de las ondas que se mueven en sentido positivo (es decir, aquellas cuyo argumento es  $x-vt$ ) debe ser positivo mientras que el de las ondas que se mueven en sentido negativo (es decir, aquellas cuyo argumento es  $x+vt$ ) debe ser negativo.

Con todo ello las soluciones de las ecuaciones diferenciales (2.4) y (2.5) son las siguientes:

$$u(x,t) = f_1(x-vt) + f_2(x+vt) \quad (2.9)$$

$$i(x,t) = \frac{1}{Z_c} f_1(x-vt) - \frac{1}{Z_c} f_2(x+vt) \quad (2.10)$$

$v$  Es la velocidad de propagación de la onda y  $f_1$  y  $f_2$  son la forma de onda de la tensión que se propaga.

Ahora bien si entramos en las relaciones entre las expresiones matemáticas de  $u$  e  $i$  obtenemos el valor de la velocidad de propagación de la onda,  $v$ , la cual está relacionada con la inductancia y la capacidad de la línea.

$$v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \quad (2.11)$$

Teniendo en cuenta la expresión de la capacidad e inductancia de una línea [Stevenson], la velocidad de propagación de la onda también se puede escribir como

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2.12)$$

Donde  $\epsilon$  y  $\mu$  son la permitividad y la permeabilidad del medio que rodea a la línea de transmisión. Para el caso de líneas aéreas los conductores son conductores desnudos, de modo que el medio que rodea la línea es el aire, cuya permeabilidad y permitividad son sensiblemente iguales a las del vacío.

$$\epsilon_0 = \frac{1}{9} \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot 10^{-9} \quad (2.13)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (2.14)$$

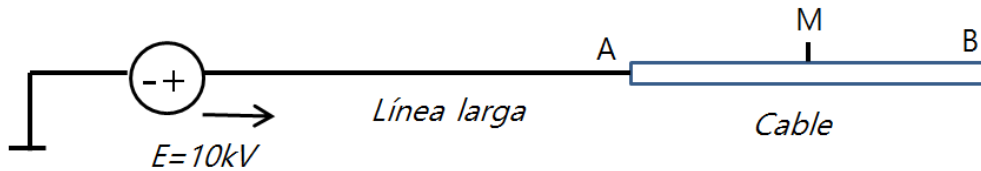
Sustituyendo en la ecuación (2.12) se obtiene que en una línea aérea la velocidad de propagación de las ondas es próxima a la velocidad de la luz,  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s^2}$ . Para el caso de cables subterráneos la permeabilidad del cable es próxima a la del vacío, pero la permitividad del aislamiento que recubre el cable (XLPE, EPR, etc) es mayor a la del vacío, con lo que la velocidad de propagación de las ondas en un cable subterráneo es menor que la velocidad de la luz (generalmente en torno a un tercio de la velocidad de la luz).

Dado que la intensidad de la ecuación se obtiene dividiendo la tensión por una constante (la impedancia característica), llegamos a la conclusión de que la impedancia característica definida por (2.8) tiene carácter resistivo, ya que en una bobina o en un condensador tensión e intensidad están ligados mediante un operador derivada, cosa que aquí no ocurre.

## **2.2 REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE ONDAS**

En una línea la relación entre la onda de tensión que se propaga, que llamaremos  $u_{i1}$  con la corriente  $i_{i1}$  en el mismo punto, debe ser según la Ley de Ohm igual a la impedancia característica de la línea  $Z_1$ .

$$u_{i1} = Z_1 \cdot i_{i1} \quad (2.15)$$



**Figura 2.2** Unión entre una línea aérea y un cable subterráneo

Cuando la onda viajera alcanza un punto en el cual cambia la impedancia característica (por ejemplo en la unión entre una línea aérea y un cable subterráneo (figura 2.2) en la nueva línea se debe verificar también que el cociente entre la onda de tensión que se transmite al cable,  $u_{i2}$ , y la onda de corriente asociada,  $i_{i2}$ , debe ser igual a la impedancia característica del segundo medio  $Z_2$ .

$$u_{i2} = Z_2 \cdot i_{i2} \quad (2.16)$$

Como es sabido, la primera ley de Kirchhoff dice que en todo punto del espacio la corriente entrante debe ser idéntica a la corriente saliente, y dado que la tensión en el punto de unión de la línea aérea con el cable (punto A en la figura 2.2) es la misma para el cable que para la línea aérea, en general la corriente  $i_{i1}$  no tiene por qué ser igual a la corriente  $i_{i2}$ . Debido a ello, el exceso de corriente debe regresar por la línea aérea hacia la fuente de alimentación

$$i_{r1} = i_{i2} - i_{i1} \quad (2.17)$$

Asociada a esta onda de corriente que regresa hacia la fuente aparece una onda de tensión

$$u_{r1} = -Z_1 \cdot i_{r1} \quad (2.18)$$

De esta forma, en el medio 1 la tensión en cada punto de la línea se obtiene como suma de las ondas que hasta ese momento hayan llegado hasta ese punto.

$$u = u_{i1} + u_{r1} \quad (2.19)$$

De igual forma la corriente en cada punto del medio 1 es la suma de las ondas de corriente que hasta ese momento hayan llegado a un punto determinado de la línea

$$i = i_{i1} + i_{r1} \quad (2.20)$$

Como se indicó, la tensión en el punto A de la figura 2.2 es única, independientemente de que esa tensión se calcule viniendo desde la línea aérea o desde el cable subterráneo.

$$u_A = u_{i1} + u_{r1} \quad (2.21)$$

$$u_A = u_{i2} \quad (2.22)$$

Si de las ecuaciones (2.15), (2.16) y (2.18) se despejan las intensidades en función de las tensiones y el resultado se introduce en (2.20) se llega a:

$$\frac{u_{i2}}{Z_{c2}} = \frac{u_{i1}}{Z_{c1}} - \frac{u_{r1}}{Z_{c1}} \quad (2.23)$$

Eliminando  $u_{i2}$  en las ecuaciones (2.21), (2.22) y (2.23) se obtiene la relación entre el valor de la onda incidente y el valor de la onda reflejada

$$u_{r1} = \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c2} + Z_{c1}} \cdot u_{i1} \quad (2.24)$$

Se define el coeficiente de reflexión  $\Gamma$  para la tensión en el extremo receptor de la línea al cociente  $\frac{u_{r1}}{u_{i1}}$ ; luego:

$$\Gamma = \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c2} + Z_{c1}} \quad (2.25)$$

De las ecuaciones (2.9) y (2.10) podemos observar que el coeficiente de reflexión para la corriente es siempre negativo e igual al coeficiente de reflexión para el voltaje cambiado de signo pues al ser la impedancia de la línea idéntica para la onda que va y para la que regresa se cumple:

$$\frac{i_{r1}}{i_{i1}} = -\frac{v_{r1}}{v_{i1}} \quad (2.26)$$

De igual manera que se ha obtenido la ecuación (2.24) se puede expresar el valor de la onda que se propaga por la línea 2 en función del valor de la onda que incide en el nudo A, quedando:

$$u_{i2} = \frac{2 \cdot Z_{c2}}{Z_{c2} + Z_{c1}} \cdot u_{i1} \quad (2.27)$$

Se define el coeficiente de refracción  $\tau$  para la tensión en el extremo receptor de la línea al cociente  $\frac{u_{i2}}{u_{i1}}$ ; luego

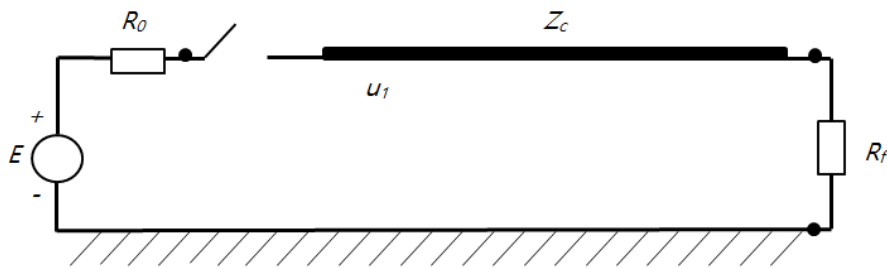
$$\tau = \frac{2 \cdot Z_{c2}}{Z_{c2} + Z_{c1}} \quad (2.28)$$

Como se indicó anteriormente, en cada punto de la línea la tensión se obtiene como suma de las ondas incidentes y reflejadas que hayan llegado a ese punto. Esto se realiza de forma muy visual mediante un diagrama de reflexiones y refracciones como se verá más adelante.

## **2.3 EFECTOS DE LA TERMINACIÓN DE LA LÍNEA**

Cuando se cierra un interruptor para aplicar un voltaje a una línea, comienza a viajar por ésta tanto una onda tensión  $v^+ = u_1$  como una onda de corriente  $i^+ = i_1$ .

La fuente de alimentación tiene una impedancia interna, por eso existirá una cierta caída de tensión en dicha impedancia y la tensión aguas arriba del interruptor no coincidirá con la tensión interna de la fuente E (figura 2.3).



a) Esquema del sistema de estudio

**Figura 2.3:** Fuente real que alimenta una línea larga

En los siguientes subapartados se obtiene la tensión que queda aplicada a la línea cuando ésta es alimentada por una fuente real, para mayor simplicidad se admitirá que la impedancia interna de la fuente es de tipo resistivo, casos más reales se pueden consultar en (Greenwood, 1991). Además, se estudiarán tres casos particulares de terminaciones de línea. El primero de ellos será una línea de extremo abierto, el segundo una línea terminada en un cable y por último un extremo de línea en cortocircuito.

### **2.3.1 Tensión aplicada a una línea alimentada por una fuente real.**

Para obtener la tensión aguas arriba del interruptor, supuesto el interruptor cerrado, escribamos las ecuaciones de la fuente y las ecuaciones de la línea.

La fuente es un circuito de parámetros concentrados, y en ella se cumple:

$$u_1 = E - R_F i_1 \quad (2.29)$$

La línea larga es un circuito de parámetros distribuidos, y en ese circuito se cumple

$$u_1 = Z_c i_1 \quad (2.30)$$

Siendo  $Z_c$  la impedancia característica de la línea.

Si de las ecuaciones (2.15) y (2.16) eliminamos la corriente queda:

$$u_1 = \frac{Z_c}{R_F + Z_c} E \quad (2.31)$$

Podemos comprobar que el valor de la tensión de la línea una vez que se cierra el interruptor depende de la resistencia interna de la fuente.

### **2.3.2 Línea de extremo abierto**

Si la línea termina en un circuito abierto el medio que está a continuación de la línea es un medio con una impedancia característica  $Z_c$  infinita. Por tanto en el extremo de línea las cargas no pueden progresar, pero como debe cumplirse la primera ley de Kirchhoff al llegar a ese punto, las cargas eléctricas deben regresar a la fuente por el mismo camino que vinieron. El coeficiente de reflexión de la tensión es 1, de modo que la onda de tensión reflejada es igual a la incidente.

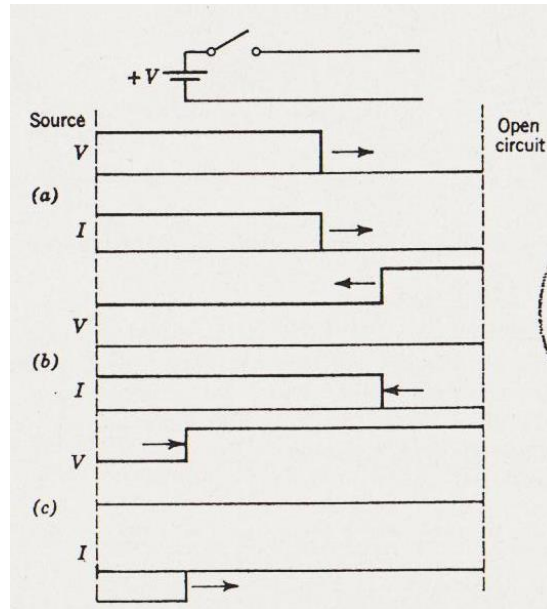
$$\Gamma = \frac{\infty - Z_c}{\infty + Z_c} = 1 \quad (2.32)$$

Dado que para las ondas que circulan de derecha a izquierda la relación entre  $u$  e  $i$  es negativa, a esta onda viajera de tensión le acompaña una onda viajera de intensidad que será negativa.

$$\frac{u_{r1}}{i_{r1}} = -Z_c \quad (2.33)$$

En aquellos puntos a los que haya llegado la onda de corriente la suma de la corriente incidente más la corriente reflejada es nula.

En la figura 2.4 se visualizan las ondas de tensión y corriente total (suma de las ondas incidentes y reflejadas) para tres instantes de tiempo distintos (a, b, y c) para el caso de una línea de transmisión con extremo abierto:



**Figura 2.4:** Modelo de energización de una línea larga en vacío  
Fuente: (Andrew.R.Hileman, 1999)

### 2.3.3 Línea terminada por un cable

Si la línea termina con un cable se debe tener en cuenta que la capacidad de un cable es mayor a la capacidad de la línea y que la inductancia del cable es menor a la inductancia de la línea. Por tanto la impedancia característica del cable  $Z_{cable}$  es menor que la impedancia característica de la línea  $Z_{línea}$ .

Si aplicamos esto a la ecuación (2.25) se comprueba que la onda de tensión reflejada será menor a cero

$$\Gamma = \frac{Z_{cable} - Z_{línea}}{Z_{cable} + Z_{línea}} < 0 \quad (2.34)$$

Mientras que la de corriente será de signo contrario a la de tensión, al ser una onda reflejada.

Las sobretensiones que pasan por el cable son menores que las que se originan por la línea, pues el coeficiente de refracción vale.

$$\tau = \frac{2Z_{cable}}{Z_{cable} + Z_{línea}} < 1 \quad (2.35)$$

#### ***2.3.4 Extremo de línea cortocircuitado***

Si estudiamos el caso de la energización de una línea cuyo extremo remoto está en cortocircuito, la onda de tensión progresa desde la fuente hasta el punto donde se encuentra el cortocircuito. A esa onda de tensión le acompaña una onda de corriente que va energizando la línea a su paso. Al llegar al cortocircuito debe aparecer una onda de tensión de signo opuesto, pues el cortocircuito implica que en dicho punto la tensión sea nula.

$$\Gamma = \frac{0 - Z}{0 + Z} = -1 \quad (2.36)$$

Esta onda de tensión negativa que se propaga de derecha a izquierda conlleva una onda de corriente positiva.

$$\frac{u_{r1}}{i_{r1}} = -Z_c \quad (2.37)$$

Una vez que las ondas que regresan llegan al extremo generador causan nuevas reflexiones que son determinadas por el coeficiente de reflexión en ese extremo, al que llamamos  $\Gamma_f$ . Sea  $Z_f$  la impedancia en el extremo generador, la ecuación (2.25) da:

$$\Gamma_f = \frac{Z_f - Z_c}{Z_f + Z_c} \quad (2.38)$$



# ***CAPÍTULO 3***

## **PARARRAYOS**

---

### **3.1 MISIÓN DEL PARARRAYOS**

Para evitar fallos en los equipos eléctricos conectados en una red, es necesario reducir las sobretensiones por debajo de los valores de las tensiones soportadas por los aislamientos de los mismos.

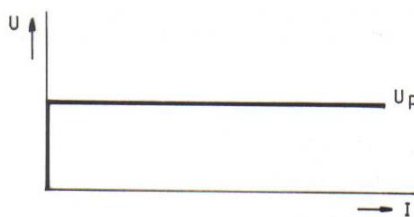
Los pararrayos constituyen por tanto un auxilio indispensable para la coordinación de aislamiento en los sistemas de suministro de energía eléctrica.

La misión del pararrayos es proteger la instalación frente a sobretensiones de corta duración (inferior a 20 ms). Estas sobretensiones que pueden provocar importantes daños al material, comprometiendo así al suministro de energía eléctrica. (ASINEL, 1979)

Los pararrayos (también llamados autoválvulas) se disponen entre fase y tierra para reducir las sobretensiones, desviando a tierra la intensidad asociada a la sobretensión.

Durante la operación normal la corriente de fuga a tierra debe ser tan reducida como sea posible.

De todo lo anterior, la curva característica ideal de un pararrayos es la de la figura 3.1.



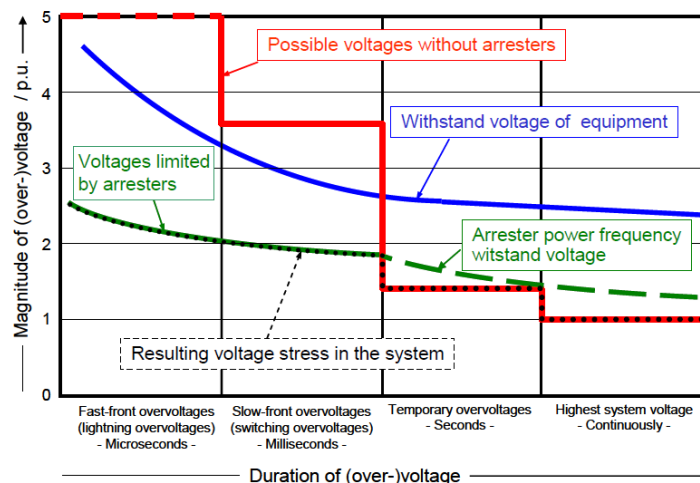
**Figura 3.1** Característica U-I ideal de un pararrayos

*Fuente: (ASINEL, 1979)*

En realidad la protección aportada por un pararrayos ( $U_p$  en la figura 3.1) depende de la amplitud y forma de la sobretensión, la característica de protección de pararrayos, la distancia entre el pararrayos y el equipo protegido incluyendo las conexiones a tierra y el número de líneas conectadas, así como su impedancia característica

Un pararrayos debe actuar ante una sobretensión de origen atmosférico (sobretensiones de frente rápido) y ante una sobretensión de maniobra (sobretensiones de frente lento). Por el contrario, no debe actuar en servicio normal de la red o ante una sobretensión temporal, ya que un pararrayos no está preparado para disipar una cantidad de energía elevada sin dañarse.

En la figura 3.2 se muestran las tensiones que pueden aparecer en un sistema de energía eléctrica de alta tensión expresadas en “por unidad” del valor de cresta de la máxima tensión permanente entre fase y tierra, dependiendo de su duración.



**Figura 3.2** Tensión de cebado de un pararrayos

*Fuente: (Hinrichsen, 2011)*

Se divide el eje de tiempos de la figura 3.2 de forma aproximada en la gama de las distintas sobretensiones atendiendo a su origen: atmosféricas (microsegundos), maniobra (milisegundos), y temporales (segundos), y por último la máxima tensión permanente de operación del sistema, ilimitada en el tiempo.

De estos tres tipos de sobretensiones son las atmosféricas en las que se centrará el estudio con actuación de pararrayos.

Como puede observarse la tensión o sobretensión que puede alcanzarse sin el uso de pararrayos en funcionamiento normal ante uno de estos fenómenos es de una magnitud de varios p.u.

Si en cambio, se considera la curva de tensión resistida del aislamiento del equipamiento se observa que, especialmente para las sobretensiones atmosféricas, el aislamiento del equipamiento no puede resistir los esfuerzos dieléctricos que se producen. Es en este punto donde intervienen los pararrayos, mientras que en servicio normal, lo cierto es que la tensión que aparece en los terminales del equipo, manteniendo siempre un adecuado margen de seguridad, estará por debajo de la tensión resistida. Por lo tanto, el efecto de los pararrayos involucra directamente a las sobretensiones atmosféricas.

La protección apartada por el pararrayos debe ser tal que la tensión en bornas del mismo durante la actuación (línea verde de la figura 3.2) debe ser inferior a la máxima tensión que es capaz de soportar el equipo sin dañarse (línea azul de la figura 3.2).

Los pararrayos se forman mediante asociación de explosores y resistencias variables en serie, que son capaces de limitar la corriente de red hasta el punto en que el arco se extingue en los electrodos.

Los parámetros más importantes del pararrayos son:

- Tensión de disparo: es el valor de la tensión a la cual el explosor actúa
- Tensión residual: es el valor de la tensión que aparece en bornas del pararrayos en el momento de máxima intensidad.
- Corriente de desviación: es el valor máximo de la corriente que circula por el pararrayos en el proceso de desvío a tierra.
- Corriente de fuga: es la corriente que circula a tierra a través del pararrayos con la tensión normal de servicio.

El pararrayos más simple sería un explosor, que consiste en dos electrodos separados por un cierto espacio de aire. La rigidez dieléctrica del aire son 30 kV/cm. Cuando se supere la tensión entre electrodos que hace que se alcance dicho campo, se cebará el arco eléctrico. Sin embargo, el comportamiento de este pararrayos elemental deja mucho que desear pues se presentan una serie de inconvenientes.

En primer lugar, la rigidez dieléctrica del aire depende de su temperatura, presión, humedad relativa, polución, etc, con lo que la tensión de ruptura no es siempre la misma. Es así que el mejor funcionamiento ocurre si los explosores están encapsulados.

La tensión de cebado varía al envejecer el explosor, por variación de su superficie

Al cebarse el arco a tierra haría que la tensión entre la fase que recibe la sobretensión y tierra fuera sólo la tensión del arco, que es una tensión muy reducida, equivalente a un cortocircuito fase-tierra, con lo que actúan las protecciones y dejan a la línea sin servicio.

Y otra de las causas por las cuales el comportamiento del pararrayos deja mucho que desear es que una vez cebado el arco ya no es posible extinguirlo a menos que se reduzca la tensión por debajo de la tensión de arco. En la práctica esto supone la interrupción del servicio con la apertura del disyuntor.

### ***3.1.1. Colocación del pararrayos***

Como regla general, los pararrayos deben situarse lo más cerca posible de los elementos a proteger, fundamentalmente de los transformadores y reactancias, por ser los equipos más costosos.

La toma de tierra del pararrayos debe estar conectada rígidamente a la del equipo a proteger mediante un conductor de baja impedancia. De esta forma se evita un aumento de la tensión en terminales de alta tensión del pararrayos, y por tanto del equipo a proteger, por efecto de la caída de tensión en la conexión de tierra al pasar por ella la corriente de descarga.

En instalaciones conectadas a la red a través de una sola línea aérea, esta recomendación es absolutamente necesaria, especialmente si la línea no está protegida por hilos de tierra, teniendo en cuenta la pendiente del frente de onda que puede presentarse en la instalación y el efecto de su reflexión en el transformador.

En el caso de instalaciones a las que llegan varias líneas, la onda procedente de una de ellas se reduce por reflexiones en los puntos donde confluyen las líneas. Esto permite colocar los

pararrayos a una cierta distancia de los transformadores de manera que puedan proteger también otros elementos de la instalación.

En las instalaciones alimentadas por una línea a través de un cable, para proteger simultáneamente los equipos y el propio cable puede ser necesario instalar pararrayos tanto junto a estos equipos como en el punto de unión de la línea con el cable.

Por lo general los pararrayos suelen colocarse:

- Próximos a los transformadores para evitar la magnificación de tensión debida a reflexiones de onda. La impedancia de onda de un transformador es muy elevada, con lo que la tensión en bornas del transformador se duplica al reflejarse la onda de sobretensión.
- En la llegada de líneas en la entrada de la subestación porque es ahí donde están los equipos más caros.
- En las conexiones entre líneas y cables: Los cables aislados son muy sensibles a las sobretensiones. Una sobretensión puede dañar el aislamiento del cable, por eso se ponen pararrayos en la unión línea cable.
- En paralelo con aisladores en puntos críticos de la red: En determinados puntos de la red en caso de caída de rayo, o por maniobras, se podría producir un arco a tierra con la consiguiente interrupción del servicio debida a la actuación de las protecciones. Sin embargo, si se pone un pararrayos, el pararrayos deriva la corriente a tierra pero a diferencia de un arco eléctrico en el que la caída de tensión es reducida, un pararrayos mantiene la tensión de la línea en un valor suficientemente elevado como para que no se pueda interpretar como un defecto a tierra, con lo que las protecciones no actúan.

Incluso se puede utilizar en paralelo con un interruptor para disminuir la tensión transitoria de restablecimiento

### ***3.1.2. Distancia entre el pararrayos y el equipo a proteger***

Si el pararrayos se sitúa a una distancia no despreciable del elemento al que protege, por necesidades determinadas puede ser utilizado este mismo pararrayos para la protección de otros elementos próximos. En estas situaciones es necesario tener en cuenta que la tensión en terminales del equipo alejado puede ser superior a la mantenida en el momento de la descarga entre terminales del pararrayos, por efecto de las reflexiones de las ondas móviles. Las sobretensiones rápidamente crecientes se propagan por la línea. En aquellos lugares donde la impedancia de onda se modifica, como puede ser el paso de línea a cable, se producen reflexiones y refracciones.

En especial, una onda de tensión se reflejará positivamente en su totalidad cuando alcance un transformador conectado en su extremo, pues éste se asemeja a un extremo abierto, dado que la inductividad de su arrollamiento presenta una gran impedancia a las frecuencias elevadas comparada con la impedancia del cable al que el grupo esté conectado. El nivel de tensión en todo instante y en todo punto de la subestación resulta de la suma de los diferentes valores instantáneos de cada onda individual de tensión. Así, en el extremo del transformador la reflexión es total y este valor de tensión se duplicará.

### **3.2 TIPOS DE PARARRAYOS**

Existen dos tipos de pararrayos: los de carburo de silicio (SiC) con explosores y los de óxido de Zinc (ZnO). Estos últimos son los que se usan actualmente y por ello serán expuestos en mayor detalle.

Los pararrayos de carburo de silicio necesitaban llevar una resistencia variable, llamada varistor, con un explosor en serie (figura 3.3) porque la corriente de fuga era muy elevada. La misión del explosor era aislar la resistencia en operación normal, mientras que la misión de la resistencia era limitar la corriente de defecto a tierra y evitar que la tensión residual fuese demasiado reducida.

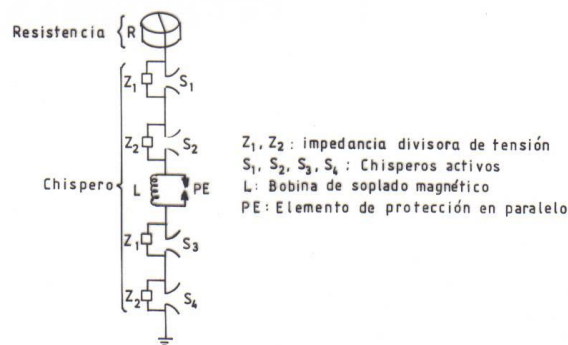


FIG.4.- UNIDAD DE PARARRAYOS DE RESISTENCIA NO-LINEAL.

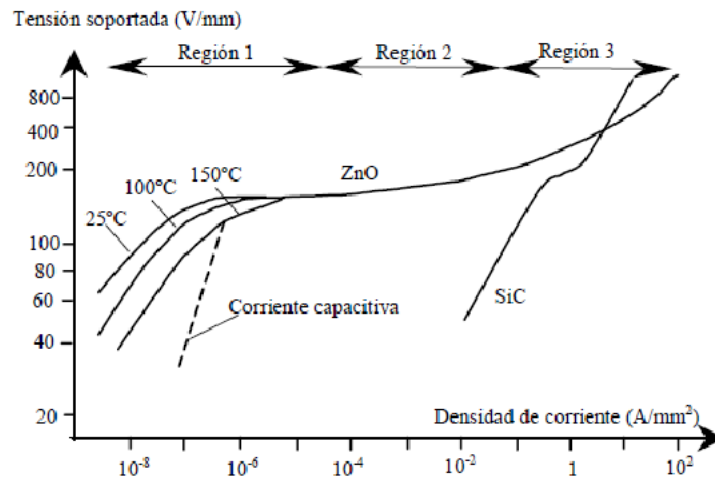
**Figura 3.3** Composición de un pararrayos de SiC

*Fuente:* (Andrew.R.Hileman, 1999)

El pararrayos de ZnO consiste en resistencias no lineales de óxidos metálicos, principalmente, el óxido de zinc y puede no llevar explosores. Los varistores están dentro de una envolvente que puede ser de porcelana o polimérica, la cual está sellada en ambos extremos por tapas o bridas.

### **3.3 CURVAS DE ACTUACIÓN**

En la figura 3.4 se muestra la curva de actuación de un pararrayos de ZnO, en la cual se distinguen tres regiones: región de predescarga, región de descarga (región no lineal) y región de alta descarga.



**Figura 3.4** Curva tensión-corriente para pararrayos de ZnO

*Fuente: (Velasco, 2007)*

En la figura 3.4 se muestra también la curva de actuación de los antiguos pararrayos de Carburo de Silicio, mucho menos no-lineal. Hoy en día esos pararrayos casi no se utilizan.

En la región de predescarga el pararrayos se comporta como un condensador. Sin embargo, en las regiones 2 y 3 el pararrayos se comporta como una resistencia. Esto tiene su repercusión a la hora de calcular la corriente de descarga de un pararrayos.

La región de predescarga corresponde a la operación normal de la red. La no linealidad de la curva permite prescindir de los explosores. Tiene una corriente de fuga reducida (del orden de 10⁻⁵ A/mm²), la cual es proporcional a la tensión. La corriente de fuga depende de la temperatura por lo que es importante a tener en cuenta que a elevadas temperaturas podría darse la destrucción del material.

La región de descarga es una zona no lineal, en la que no existe dependencia entre la corriente de descarga y la temperatura. Una simplificación de la curva característica en esta zona es la siguiente ecuación:

$$I = \beta U^\alpha \quad (3.1)$$

Donde  $I$  es la corriente de descarga,  $U$  la tensión residual y  $\alpha$  es mayor a 30 y menor 50.

Cuando la energía a drenar es muy elevada el punto de funcionamiento del pararrayos pasa a la región 3. La región 3 es una zona lineal de densidad de corriente superior a  $0,2\text{A/mm}^2$  pero inestable térmicamente y puede conducir a la destrucción del pararrayos.

Las diferencias constructivas entre los pararrayos de ZnO y los de SiC es que en los pararrayos de ZnO al no tener explosor la construcción es más simple y como tiene menos piezas, la confiabilidad es mayor. La diferencia en las características de los materiales (SiC y ZnO) es significativa: Los discos o bloques hechos de ZnO tienen una característica no lineal muy superior a los de SiC. Precisamente debido a ello los pararrayos de ZnO no requieren explosores. La característica no lineal del ZnO, permite lograr niveles de protección mejores que los de SiC. Los pararrayos de ZnO, tienen mayor capacidad de absorción de energía, lo cual permite realizar la protección contra sobretensiones de maniobra, esto no era posible con los de SiC. Además los pararrayos de óxido de zinc presentan: una tensión residual muy estable, un paso muy rápido de la región de alta impedancia a la región de baja impedancia, una disminución del riesgo de explosión, encapsulados en resina aumentan la capacidad de disipar energía y la posibilidad de determinar su grado de envejecimiento midiendo la corriente de fuga.

### **3.4 SELECCIÓN**

La selección del pararrayos se realiza de acuerdo con la norma UNE 60099 (UNE-EN, 2013) (UNE-EN60099-4, 2015). Para la selección del pararrayos se debe:

➤ **Garantizar que no actúa si no hay sobretensión**

Para ello se debe seleccionar la tensión de funcionamiento continuo ( $U_c$  o MCOV), que es la tensión eficaz máxima que se puede aplicar al pararrayos durante un tiempo indefinidamente largo. El pararrayos debe ser capaz de soportar la tensión máxima de la red.

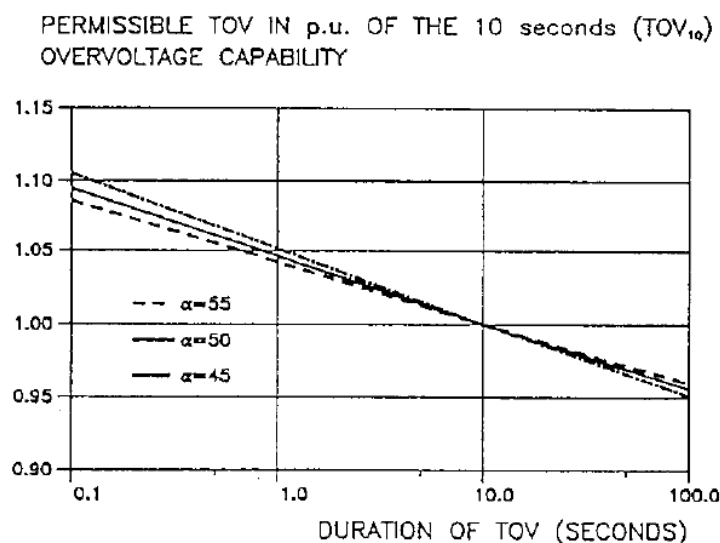
$$U_c \geq \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

Se recomienda que  $U_c$  sea al menos un 5% mayor que el cociente  $\frac{U_s}{\sqrt{3}}$ . Con la tensión de funcionamiento continuo la corriente que drena el pararrayos a tierra es casi nula.

También se debe seleccionar la tensión nominal asignada ( $U_r$ ), que es la máxima tensión de frecuencia industrial admisible (con funcionamiento correcto) en condiciones de sobretensión temporal durante los ensayos. Es la tensión de frecuencia industrial que es capaz de soportar durante 10s después de haber sometido al pararrayos a impulsos de corriente normalizados. Se elige en función de la tensión más elevada de la red: típicamente un 25% mayor que MCOV ( $U_r=1,25U_c$ )



En la figura 3.5 se puede observar la máxima tensión temporal que es capaz de soportar un pararrayos en función su duración como múltiplo de la tensión que puede soportar durante 10s.



**Figura 3.5** Capacidad para soportar sobretensiones temporales  $TOV_c$   
Fuente: (Andrew.R.Hileman, 1999)

Por esta razón

- Si la duración de la sobretensión temporal  $< 10s$  entonces  $U_r \geq TOV$ .
- Si la duración de la sobretensión temporal  $> 10s$  entonces  $U_r \geq 1,05 \cdot TOV$

➤ **Garantizar que actúa correctamente con sobretensión**

La corriente nominal de descarga es la corriente que puede circular por el pararrayos en la zona de descarga. Los pararrayos se ensayan con un impulso de corriente de ese valor de cresta. Para la selección hay 3 valores normalizados: 5, 10 y 20 kA. La selección entre los tres se realiza en función de la tensión nominal de la red.

Para la protección de sobretensiones de tipo rayo generalmente se instalan pararrayos con las siguientes corrientes nominales de descarga: para la gama I las corrientes son de 5-10 kA y la gama II de 10-20 kA.

La tensión residual (tensión de descarga) es el valor de cresta de la tensión que aparece en bornas del pararrayos durante la descarga. Determina el nivel de protección que proporciona el pararrayos y depende de la forma de onda de la corriente a descargar. Puede tratarse de Switching Impulse Protection Level (SIPL) o Lightning Impulse Protection Level (LIPL).

Sin embargo, si el pararrayos se encuentra muy alejado del equipo a proteger puede ocurrir que aparezca una tensión mayor en bornas del equipo debido a las reflexiones de onda; pues en esos casos el pararrayos se ceba sólo con la onda de tensión incidente, mientras que en

bornas del equipo a proteger se tiene la suma de la onda incidente y de la onda reflejada, y esta suma puede ser superior a la onda incidente.

La clase de descarga es la capacidad del pararrayos para disipar energía de descarga de una línea. Depende de la corriente nominal de descarga, de la tensión residual y del tiempo de descarga. Existen de 1 a 5 clases de descarga y a mayor clase, mayor precio. Para la selección se debe tener en cuenta el valor de la corriente de descarga. Se emplea las clases 1 y 2 para líneas apantalladas y las clases 2 y 3 para líneas sin apantallar. En la figura 3.6 se muestran los distintos tipos de clase de descarga.

Corriente de descarga $I_n$	Clase de descarga de línea	Impedancia de onda de la línea $Z()$	Duración convencional de la cresta $T(\mu\text{s})$	Tensión de carga $U_I$ (kV de tensión continua)
10 kA	1	$4,9 \cdot U_r$	2.000	$3,2 \cdot U_r$
	2	$2,4 \cdot U_r$	2000	$3,2 \cdot U_r$
	3	$1,3 \cdot U_r$	2400	$2,8 \cdot U_r$
20 kA	4	$0,8 \cdot U_r$	2800	$2,8 \cdot U_r$
	5	$0,5 \cdot U_r$	3200	$2,4 \cdot U_r$

**Figura 3.6:** Parámetros para el ensayo de descarga de línea en pararrayos de 10 kA y 20 kA para determinar la clase de descarga de la línea.  
(UNE-EN60099-4, 2015)

➤ **Otras características a tener en cuenta:**

La energía disipada por el pararrayos. La energía es el producto de la tensión por la intensidad y por el tiempo. En el caso la tensión es la tensión en bornas del pararrayos durante la descarga, la intensidad es la que debe drenar el pararrayos para conseguir que la sobretensión generada en la línea ( $U_L$ ) se reduzca a  $U_{res}$  y el tiempo es la duración de la sobretensión.

Por ejemplo, en el caso de energización o reenganche de líneas la energía disipada viene dada por la ecuación:

$$W = U_{res} \cdot \frac{(U_L - U_{res})}{Z} T \quad (3.3)$$

Donde  $U_L$  es la sobretensión en la línea y  $U_{res}$  es la tensión residual (ante sobretensiones de maniobra) y  $T$  es el tiempo de viaje de la onda desde la fuente al lugar en el que se encuentra el pararrayos.

La línea de fuga es importante en entornos salinos o muy contaminados. Se definen 4 niveles de contaminación que se definen en la figura 3.7.

Otros aspectos a tener en cuenta son el tipo de envolvente, bien sea más conveniente la elección de cerámica, vidrio o resina. Y el dispositivo de desconexión en caso de averías del pararrayos.

<b>Nivel de contaminación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Línea de fuga específica nominal mínima mm/kV</b>
<b>I Ligero (L)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zonas sin industrias y baja densidad de viviendas y calefacción</li> <li>- Zonas de baja densidad de industrias o viviendas, sometidas a viento o lluvias frecuentes</li> <li>- Zonas agrícolas (sin quemado de residuos)</li> <li>- Zonas montañosas</li> </ul>	16mm/kV
<b>II Medio (M)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zonas con industrias que no producen humo especialmente contaminante, y/o con densidad media de viviendas con calefacción.</li> <li>- Zonas con elevada densidad de industrias y/o viviendas, sometidas a viento o lluvias frecuentes</li> <li>- Zonas expuestas a vientos desde el mar, pero no muy próximos a la costa (nunca menos de 1km)</li> </ul>	20mm/kV
<b>III Fuerte (H)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zonas con elevada densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades, con elevada densidad de calefacción generando contaminación</li> <li>- Zonas cercanas al mar o en cualquier caso expuestas a vientos relativamente fuertes provenientes del mar</li> </ul>	25mm/kV
<b>IV Muy fuerte (V)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zonas (extensión moderada) sometidas a polvos conductores y a humo industrial que produce depósitos conductores especialmente espesos</li> <li>- Zonas (extensión moderada) muy próximas a la costa y expuestas a pulverización salina o a vientos muy fuertes y contaminantes del mar</li> <li>- Zonas desérticas caracterizadas por no tener lluvias durante largos períodos, expuestas a fuertes vientos que transportan arena y sal, y sometidas a condensación regular.</li> </ul>	31mm/kV

**Figura 3.7:** Línea de fuga específica nominal en función del nivel de contaminación

Fuente: (Society, 1999 )

# ***CAPÍTULO 4***

## **MODELIZACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS MEDIANTE ATPDRAW**

---

#### **4.1. ¿QUÉ ES ATP?**

ATP (Alternative Transients Program) es un programa destinado al análisis de circuitos eléctricos, especialmente en régimen transitorio. El programa permite modelar matemáticamente sistemas eléctricos, mecánicos y de control, tanto monofásicos como trifásicos.

El programa ATP surge en el año 1984 cuando los *Drs. W. Scott Meyer y Tsu-huei Liu* no aprobaron la comercialización del EMTP por parte de DCG (*"EMTP Development Coordination Group de la BPA"*) y EPRI (*"Electric Power Research Institute"*). Los *Drs. Meyer y Liu* empezaron el desarrollo del ATP como una alternativa no comercializada del EMTP, pero basado en una copia de éste colocada en el dominio público.

En términos generales, el programa es el mismo y suele mencionarse como EMTP, ATP o bien EMTP-ATP.

Aunque es un programa de simulación que no se estudia, hasta el momento, en la Universidad este es una buena alternativa para la simulación de transitorios. El uso de los diferentes programas de simulación se ha convertido en una herramienta indispensable para el estudio de fenómenos electromagnéticos y por ello otra de las causas por las que se emplea ATP para la realización de las simulaciones de este trabajo es para que sirva de base para poder realizar prácticas de simulación de transitorios con ATP en un futuro (Group, 1982-92).

#### **4.2. MÓDULOS MÁS IMPORTANTES**

La base de este programa se centra en la realización del circuito eléctrico en la ventana de ATPDraw. En ella podemos encontrar una lista de componentes con las que se crean los circuitos. Si seleccionamos un componente se nos abre una ventana donde podemos introducir las características y parámetros de éste. En la figura 4.1 se representan los componentes más importantes de ATPDra (Kizilcay, 2008):

<b>Sondas mono y trifásicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puntas de prueba para la tensión de un de nodo, la tensión de una rama, la corriente, salidas de TACS y salidas de MODELS.</li> <li>- Colector (acoplador entre circuitos multifásicos y monofásicos).</li> <li>- Trasposición de fases.</li> </ul>
<b>Ramas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ramas lineales: monofásicas y trifásicas con componentes no acoplados</li> <li>- Ramas no lineales: Resistencias monofásicas y bobinas saturables con componentes no lineales. Pararrayos de óxidos metálicos.</li> </ul>
<b>Líneas y cables</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- De parámetros concentrados: equivalentes PI (tipo 1,2,...) y RL componentes acoplados (tipo 51,52,...)</li> <li>- De parámetros distribuidos: componentes distribuidos con frecuencia constante.</li> <li>- LCC: el usuario puede elegir entre diferentes modelos de fase líneas/cables documentados en la bibliografía.</li> <li>- Read PCH file: archivo de ATPDraw que puede leer archivos constantes de líneas.</li> </ul>
<b>Interruptores</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interruptor convencional controlado por tiempo</li> <li>- Interruptor controlado por voltaje</li> <li>- Diodos, tiristor, triac</li> <li>- Interruptor controlado por señal de control (TACS).</li> <li>- Interruptores de medida</li> <li>- Interruptores de cierre estadístico y sistemáticos</li> </ul>
<b>Fuentes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fuentes DC y AC (3 fases). Pueden conectadas a tierra o flotantes.</li> <li>- Generadores de rampas</li> <li>- Fuentes de tipo impulso</li> <li>- TACS fuentes controladas</li> </ul>
<b>Máquinas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maquinas síncronas (diversos modelos)</li> <li>- Máquina universal</li> <li>- Máquinas de inducción (diversos modelos)</li> </ul>
<b>Transformadores</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transformador ideal monofásico</li> <li>- Transformador trifásico</li> <li>- Transformador saturable monofásico</li> <li>- Transformador saturable trifásico</li> <li>- Subrutinas de obtención de parámetros</li> <li>- Modelo híbrido</li> </ul>
<b>Sistemas de control</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- TACS (Transient Analysis of Control Systems)</li> <li>- MODELS</li> </ul>

**Figura 4.1:** Módulos más importantes en ATPDraw (Group, 1982-92)

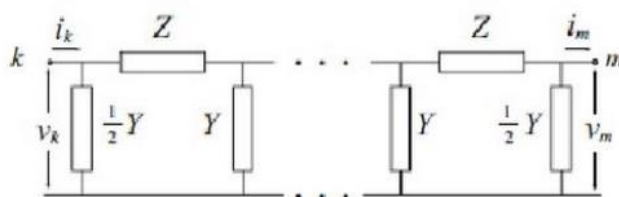
## 4.3. MÓDULOS EMPLEADOS

### 4.3.1. Módulos de líneas de transmisión empleadas

Para la elección del modelo de línea el indicador más importante a tener en cuenta es la longitud de la línea y el tiempo de subida de la onda de tensión o de corriente aplicada.

Así, los modelos de línea  $\pi$  son muy útiles cuando se desea analizar las sobretensiones temporales: sobretensiones debidas a faltas a tierra, pérdida de carga, resonancia o ferorrresonancia.

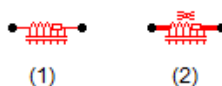
Sin embargo, cuando se desea estudiar las sobretensiones debidas a operaciones de maniobra de interruptores o descargas atmosféricas el modelo que se debe seleccionar es el modelo de parámetros distribuidos, compuesto por modelos  $\pi$  en cascada (figura 4.2). Dado que en este Trabajo Fin de Grado se realiza el estudio de fenómenos transitorios en líneas de transmisión, éste será el modelo empleado.



**Figura 4.2:** Modelo de línea de ondas viajeras

Fuente: (Stevenson, 1965)

Se dispone de modelos de líneas de transmisión de parámetros distribuidos monofásicas ((1) en la figura 4.3) y modelos de líneas de transmisión de parámetros distribuidos trifásicas ((2) en la figura 4.3). En el caso de este Trabajo Fin de Grado el sistema a estudiar es un sistema trifásico. En los modelos de línea trifásica se debe introducir, además de la impedancia característica de la línea a secuencia directa, la impedancia característica ante secuencia homopolar. En la figura 4.3 se muestran los iconos de los módulos de las líneas de transmisión con estas características en ATPDraw:



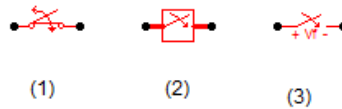
**Figura 4.3:** Módulos empleados de líneas de transmisión

### **4.3.2. Módulos de tipos de interruptores empleados**

Dependiendo del tipo de línea que se haya seleccionado se empleará un interruptor u otro. Los interruptores que se emplean son interruptores controlados por tiempo.

El interruptor controlado por tiempo normalmente es de tipo abierto y su función de abrir o cerrar se controla por tiempo en forma determinista. Para ello en ATPDraw necesitamos introducir un tiempo de “*tclose*” o tiempo de cierre en segundos y “*topen*” tiempo de apertura en segundos. Otro valor que puede diseñar el interruptor es la corriente máxima que puede arrancar. El interruptor abre cuando la corriente que le atraviesa es menor o igual a la corriente de arranque. Si se desea se puede dotar al interruptor de múltiples reenganches.

Si la línea es monofásica se emplea un interruptor monofásico (1) y si la línea es trifásica el interruptor también será trifásico (2). En (3) se muestra el interruptor controlado por tensión. En la figura 4.4 se muestran los iconos de ambos tipos de interruptor en ATPDraw:



**Figura 4.4:** Módulos empleados de tipos de interruptor

### **4.3.3. Módulos de tipos de fuentes empleados**

El programa permite la representación de fuentes de excitación, tensión o corriente que están definidas analíticamente en él.

ATP dispone de muchos tipos de fuentes tales como:

- Fuentes de corriente alterna
- Fuentes de corriente continua
- Fuentes de tipo rampa
- Fuentes de tipo impulso
- Fuentes basadas en TACS
- Etc

Las fuentes pueden ser configuradas como fuentes de tensión o como fuentes de corriente. Las fuentes son configurables en amplitud, duración, etc. Al seleccionar una fuente aparece una pantalla en la que hay que introducir los valores precisos para configurar la fuente. En estas pantallas se dispone de un botón HELP que proporciona información sobre la fuente (expresión matemática, significado de los parámetros de configuración, etc).

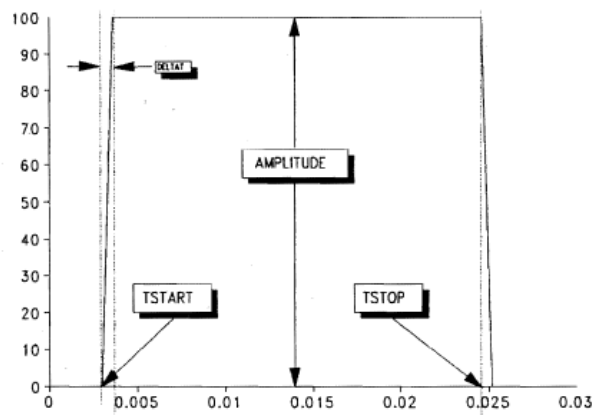
En esta trabajo Fin de Grado se utilizarán para las simulaciones fuentes de corriente continua, fuentes de corriente alterna y fuentes HEIDLER que serán utilizadas para modelar los rayos.



Como fuente de corriente en continua la fuente que se ha empleado es la fuente llamada “DC type 11” (2) programada como fuente de tensión. Esta fuente es una función de tipo

$$F(t)=\text{Amplitud}$$

Es una función de paso aproximado. Si partimos de una condición inicial en la que la fuente vale cero, la fuente sube a su valor final en un tiempo Delta T. Delta T es el paso de integración del programa que puede ser introducido en las opciones de simulación de ATPDraw y para este tipo de fuente de gran importancia pues cuanto menor sea delta T más se aproxima a una fuente escalón ideal. En la figura 4.5 se observa el comportamiento en el tiempo de esta fuente:



**Figura 4.5:** Fuente DC tipo escalón (Tipo 11) en ATPDraw  
Fuente: (Correa, 1995)

También utilizaremos fuentes de corriente alterna, en las que se puede variar la amplitud, el ángulo de fase y la frecuencia. Estas fuentes pueden ser monofásicas o trifásicas.

Para la simulación de impulsos tipo rayo se han utilizado dos tipos de fuentes: las fuentes de tipo HEIDLER y la fuente SLOPE. La razón de utilizar dos tipos de fuentes diferentes es comprobar los resultados de las simulaciones utilizando como referencia los resultados obtenidos por otros autores. En ambos casos la fuente se ha definido como fuente de corriente.

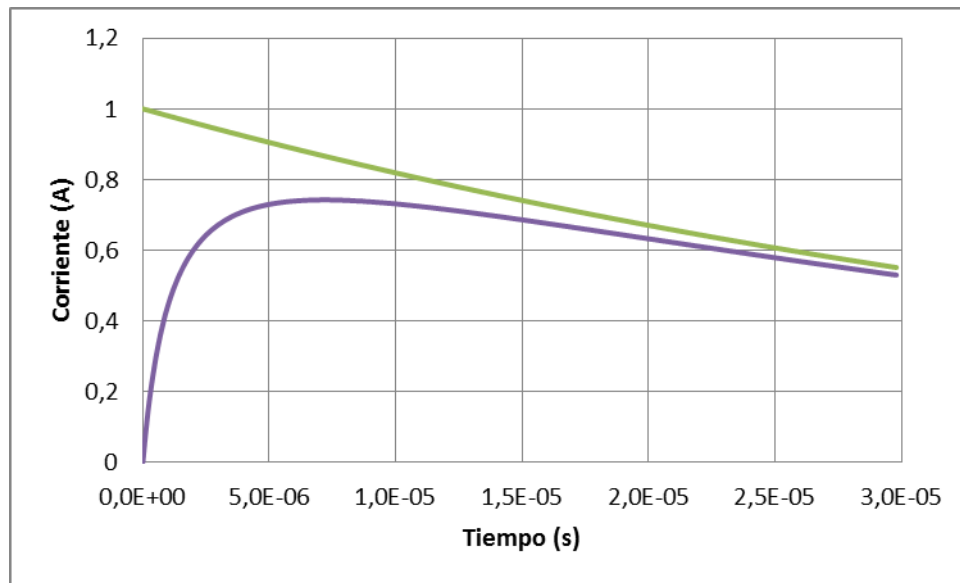
La fuente “HEIDLER type 15” (3) es una fuente es de tipo impulso basada en una exponencial. Este modelo de fuente es relativamente reciente y fue introducida como alternativa al tipo de fuente impulso de doble exponencial. La expresión matemática de la fuente HEIDLER es del tipo

$$i(t) = Amp \cdot \frac{\left(\frac{t}{T_f}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{T_f}\right)^n} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.1)$$

Dónde:

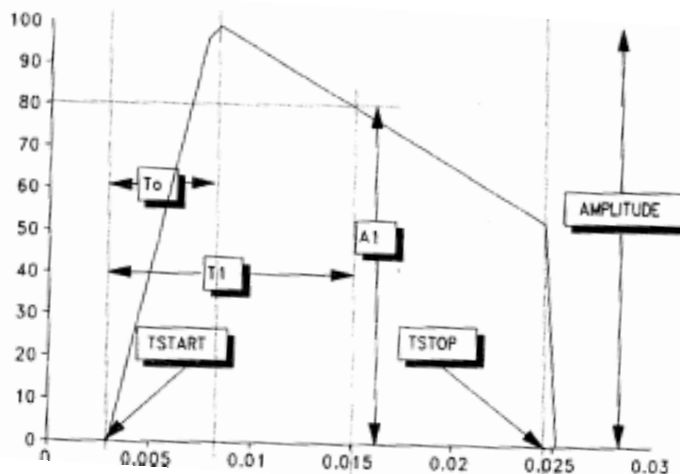
- Amp es un factor multiplicador (en voltios o amperios) relacionado con la amplitud de la onda, aunque en sí mismo no es la amplitud.
- Tf es la duración del frente de onda (en segundos)
- t es la duración del impulso
- n es un factor que interviene en la tasa de crecimiento de la onda (a mayor valor de n mayor pendiente). Suele valer entre 5 y 10

En esta expresión, vale 0 para  $t=0$ , aumenta al transcurrir el tiempo hasta alcanzar un máximo, y para tiempos muy largos el numerador y el denominador coinciden y la función tiende a una exponencial decreciente, figura (4.6)



**Figura 4.6:** Función Heidler (curva violeta) y exponencial decreciente (curva verde)

En otras simulaciones de impulsos tipo rayo se ha empleado la fuente SLOPE (4) de ATPDraw. Es una fuente rampa de doble pendiente que tiene un crecimiento lineal desde TSTART hasta un tiempo To después (figura 4.7). A partir de este tiempo la fuente tiene un cambio de pendiente, así: si  $A1 > \text{Amplitud}$  la nueva pendiente será creciente y si  $A1 < \text{Amplitud}$  la pendiente será decreciente. Para definir la fuente hay que proporcionar los valores de amplitud, To, A1, T1, tiempo de inicial y tiempo de parada que se representan en la figura 4.7.



**Figura 4.7:** Fuente SLOPE tipo rampa (tipo 12) en ATPDraw  
*Fuente: (Correa, 1995)*

#### **4.3.4. Módulos del tipo de transformador empleado**

ATPDraw proporciona diferentes tipos de transformadores, desde transformadores ideales sin impedancia interna ni corriente de vacío (únicamente con una relación de transformación), hasta transformadores saturables, en los que la corriente de vacío es no sinusoidal. El modelo de transformador utilizado en este Trabajo Fin de Grado es el denominado "BCTTRAN" (1) en ATPDraw. Este tipo de transformador está basado en la representación matricial. Es muy preciso en la representación del comportamiento de impedancia, tanto de la parte real como imaginaria. Permite tratar transformadores monofásicos y trifásicos de 2 o 3 arrollamientos.

Su funcionamiento es la simulación es totalmente lineal, despreciando así los efectos topológicos de los arrollamientos y no considerando los efectos debidos a los diferentes tipos de núcleos existentes. Así mismo, la saturación de la rama de magnetización en el núcleo no entra en consideración aun cuando se consideran los acoplamientos entre fases y las características de conectores externos. No obstante, si se desea se puede utilizar conjuntamente con una inductancia saturable conectada externamente, que simularía el efecto de la saturación del núcleo. Esta rama externa también puede estar formada por una asociación en paralelo de una resistencia de pérdidas en el hierro y de una reactancia.

En la pantalla de introducción de datos (figura 4.8) se han de introducir los resultados de los ensayos de cortocircuito y de vacío (si no se usa en conjunción con una inductancia externa).

El modelo BCTTRAN no permite la introducción de capacidades entre arrollamientos y entre estos y núcleo magnético.

Un modelo más sofisticado de transformador es el modelo híbrido que puede tener de 2 a 4 arrollamientos. En este modelo sí que es posible tener en cuenta las capacidades parásitas de los arrollamientos, así como diferentes tipos de núcleos magnéticos tales como bancos de transformación, transformadores de núcleo trifásico, transformadores de cinco columnas,

transformadores acorazados, etc. Incluso permite introducir el orden en el que se encuentran los arrollamientos en la ventana del transformador.

Los valores de los parámetros se pueden obtener de ensayos, de parámetros de diseño o se pueden adoptar valores típicos. En la figura 4.8. Se muestra la ventana de introducción de datos de este modelo de transformador.

The screenshot shows the 'Hybrid transformer' window with the following sections:

- Structure:**
  - Number of phases: 3
  - Number of windings: 3
  - Type of core: 3-leg stacked
  - Test frequency [Hz]: 50
  - Data based on: Ind. (selected), Res., Cap., Core
  - Design param. (radio button)
  - Test report (radio button)
  - Typical values (radio button)
- Ratings & connections:**

	Prim.	Sec.	Tert.
L-L voltage [kV]	320	145	12.5
Power [MVA]	200	200	10
Connections	Y	Y	Y
Phase shifts	0	0	0
Node names			
- Data:**
  - Inductance | Resistance | Capacitance | Core
  - Data equal to Resistance's Test report
  - ☐ Zero sequence data available
  - positive sequence**

	Imp. (%)	Pow. (MVA)	Loss (kW)
P-S	6.2	200	25.6
P-T	0	0	0
S-T	0	0	0
- Order:** 0 **Label:**  **Comment:**  ☐ Hide
- Buttons:** OK, Cancel, Import, Export, Edit defin., Help

**Figura 4.8:** Introducción de datos para el modelo híbrido de transformador.

Caso de que se disponga de datos para construir el modelo de secuencia homopolar del transformador también se pueden introducir esos datos. En caso contrario se toman iguales a los parámetros de secuencia directa.

### 4.3.5. Módulos del tipo de pararrayos empleado

ATPDraw dispone de una variedad de impedancias no lineales, tales como resistencias no lineales, dependientes de la intensidad o de la temperatura, inductancias saturables, dependientes de la corriente, resistencias dependientes de modelos TACS. Para el modelado de pararrayos ATPDraw dispone de un módulo denominado “MOV” (1).

El módulo MOV responde a la ecuación

$$i = p \cdot \left( \frac{u}{V_{ref}} \right)^q \quad (4.2)$$

Dónde:

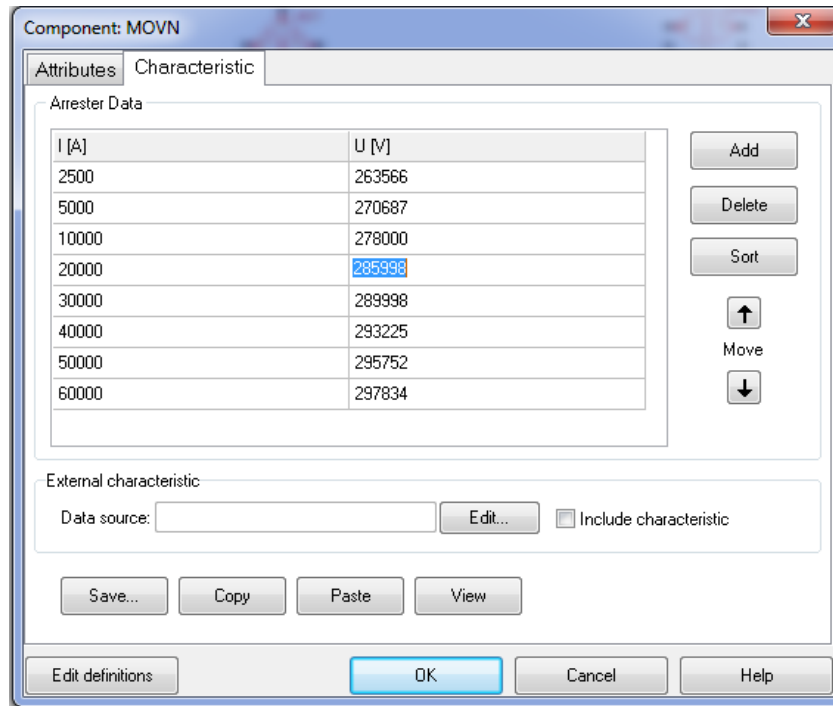
- Vref es la tensión de referencia (en V). Su valor se debe elegir en el entorno de la tensión nominal del pararrayos (típicamente Vref es el doble de la tensión nominal del elemento a proteger).
- p corresponde a la intensidad de referencia del pararrayos
- q es el coeficiente de no linealidad.

Los parámetros que hay que seleccionar para definir el pararrayos son (figura 4.9)

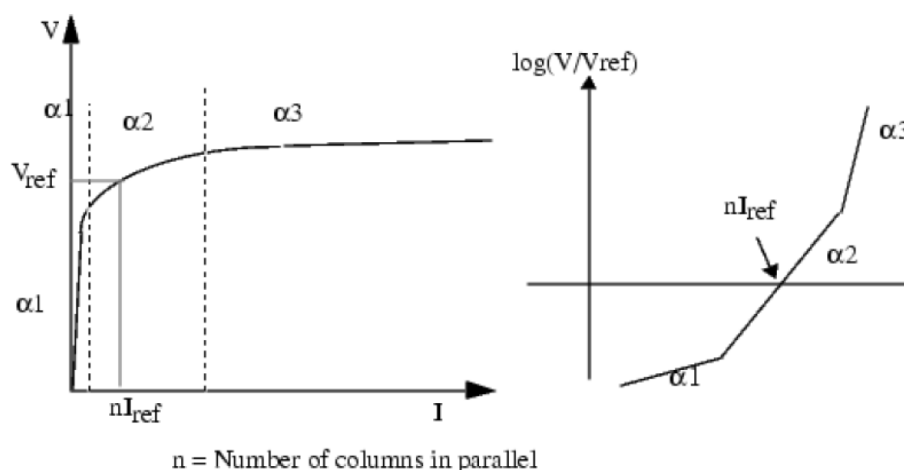
- Vflash: La tensión de cebado del pararrayos, expresada en p.u. sobre la tensión de referencia Vref.
- Vzero: La tensión inicial de la pararrayos (en Voltios). Este valor es opcional.
- COL: es el número de columnas en paralelo que dispone el pararrayos.
- SER: Es el número de elementos en serie del pararrayos.
- ErrLim: es la tolerancia que se admite (en p.u.) a la hora de ajustar la ecuación indicada anteriormente.
- Ilim: Es la intensidad por debajo de la cual el pararrayos se admite lineal.

**Figura 4.9:** Introducción de datos para el modelo de pararrayos.

La curva no lineal de funcionamiento del pararrayos no se introduce indicando los valores de  $p$  y  $q$ , sino que estos valores  $p$  y  $q$  se obtienen ajustando una curva introducida por puntos (figura 4.10). Es posible introducir hasta 29 puntos. Los parámetros  $p$  y  $q$  mencionados se obtienen de mediante un ajuste por mínimos cuadrados en el dominio log-log dividido en un cierto número de segmentos que depende de la tolerancia que se haya admitido para el ajuste (ErrLim) (figura 4.11).



**Figura 4.10:** Curva de la pararrayos introducida por puntos



**Figura 4.11:** Ajuste de la curva de la pararrayos introducida por puntos

*Fuente: (Andrew.R.Hileman, 1999)*

#### ***4.3.6. Otros tipos de modelos***

Como se indicó en el apartado 4.2. ATPDraw dispone también de otros tipos de modelos, tales como modelos de cables, modelos de máquinas rotativas, modelos de sistemas de control o modelos propios. No obstante estos modelos no se describirán aquí ya que no han sido utilizados en este Trabajo Fin de Grado.

# ***CAPÍTULO 5***

## **SIMULACIONES REALIZADAS**

---



## **5.1. SIMULACIONES REALIZADAS**

En el presente Trabajo Fin de Grado se van a realizar una serie de simulaciones que permitan estudiar las sobretensiones que alcanzan un transformador y la forma de amortiguarlas mediante el empleo de pararrayos.

Dado que no se disponía de experiencia alguna sobre el manejo de ATPDraw, para alcanzar este objetivo final se ha partido de un modelo muy simple (la energización de una línea larga en vacío) que se ha ido complicando hasta llegar al modelo final objeto de este TFG. En cada uno de los modelos intermedios se han hecho simulaciones para comprobar que los modelos dan resultados contrastables con la teoría descrita en los libros sobre este tipo de temas.

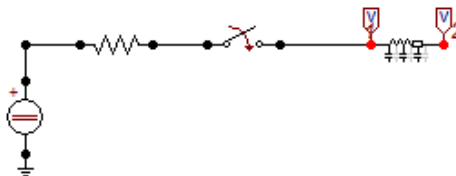
En este capítulo se definen las simulaciones a realizar y en el capítulo siguiente se expondrán los resultados obtenidos.

## **5.2. MODELO DE ENERGIZACIÓN DE UNA LÍNEA LARGA EN VACÍO**

El análisis del transitorio de energización de una línea larga en vacío es de interés por varios motivos: en primer lugar, se trata de una simulación muy sencilla y fácil de analizar mediante ecuaciones, y los resultados de esta simulación están bien documentados en la bibliografía, lo que permite verificar que se está trabajando de forma correcta. En segundo lugar mediante esta simulación es posible analizar la influencia de los diferentes parámetros de la fuente de tensión de y de la línea en los resultados. Por último servirá como simulación de referencia para analizar la influencia de la terminación de la línea cuando al final de la misma se introduce un transformador.

### ***5.2.1 Modelo de energización de una línea larga en vacío con fuente de corriente continua***

Para analizar el transitorio de energización de una línea larga en vacío inicialmente consideraremos el caso más simple de que la fuente alimentación es una fuente de corriente continua porque permite apreciar con mayor claridad los fenómenos que tienen lugar (figura 5.1). Como impedancia de la fuente tomaremos una resistencia  $R_f$ .



**Figura 5.1:** Modelo de energización de una línea larga en vacío

Realizaremos simulaciones variando la resistencia interna de la fuente y la resistencia de la línea. Por lo que se refiere a la conductancia eléctrica de la línea a tierra, ATPDraw permite

considerar dos posibilidades. La primera es considerar  $G=0$  y la segunda el caso simple  $G=R \cdot C/L$ .

Los valores de la resistencia de la línea se han tomado de la tabla 5.2, extraída de (Stevenson, 1965), en la que se muestran los valores típicos de la resistencia  $\left[\frac{\Omega}{\text{millas}}\right]$  de un cable de aluminio reforzado en acero con conductores de una sola capa, bajo las condiciones de trabajo dadas. El resto de los valores del circuito se ha tomado de (Velasco, 2007) con objeto de poder validar los resultados de la simulación; estos últimos se muestran en la tabla 5.1

Impedancia característica de la línea $[\Omega]$	350
Longitud de la línea [km]	100
Velocidad de propagación de las ondas de la línea $\left[\frac{\text{km}}{\text{s}}\right]$	300.000

**Tabla 5.1:** Valores de los elementos del circuito en la energización de una línea larga alimentada por una fuente de corriente continua

Circular mils <sup>a</sup> o galgas americanas de alambre (A.W.G.) de aluminio	Aluminio		Acero		Equiv. cobre <sup>*</sup> circular mils o AWG	Carga de rotura lib <sup>*</sup>	Peso lib./mil <sup>2</sup>	Radio medio geométrico a 60 Hz para una corriente aprox. del 75 % de su capacidad & lib./mil <sup>2</sup>	Capacidad aproximada de corriente A	Resistencia ohm/conductor/milla <sup>*</sup>						Reactancia inductiva ohm/conductor/milla <sup>*</sup> a 1 pie de separación						Reactancia capacitiva megohm/conductor/milla <sup>*</sup> a 1 pie de separación					
	Hilos	Capas	Hilos	Diámetro hilo pulg						Diámetro ext. pulg	25°C (77°F) corrientes pequeñas				50°C (122°F) corriente del 75 % cap. &				25 Hz	50 Hz	60 Hz	25 Hz	50 Hz	60 Hz	25 Hz	50 Hz	60 Hz
											c.c.	25 Hz	50 Hz	60 Hz	c.c.	25 Hz	50 Hz	60 Hz									
1,590,000	54	3	9	1716	19	0.1030	1,545	1,000,000	58,000	10,777	0.0520	1,380	0.0587	0.0588	0.0590	0.0591	0.0646	0.0656	0.0675	0.0684	0.1495	0.299	0.359	0.1953	0.0977	0.0814	
1,510,500	54	3	9	1673	19	0.1004	1,500	950,000	53,200	10,237	0.0507	1,340	0.0618	0.0619	0.0621	0.0622	0.0680	0.0690	0.0710	0.0720	0.1508	0.302	0.363	0.1971	0.0986	0.0821	
1,431,000	54	3	9	1628	19	0.0977	1,465	900,000	50,400	9,699	0.0493	1,300	0.0652	0.0653	0.0655	0.0656	0.0718	0.0729	0.0749	0.0760	0.1522	0.304	0.365	0.1991	0.0999	0.0830	
1,351,000	54	3	9	1582	19	0.0949	1,424	850,000	47,600	9,160	0.0479	1,250	0.0691	0.0692	0.0694	0.0695	0.0761	0.0771	0.0792	0.0803	0.1539	0.307	0.369	0.201	0.1005	0.0838	
1,272,000	54	3	9	1535	19	0.0921	1,382	800,000	44,800	8,621	0.0465	1,200	0.0734	0.0735	0.0737	0.0738	0.0808	0.0819	0.0840	0.0851	0.1551	0.310	0.372	0.203	0.1016	0.0847	
1,192,500	54	3	9	1488	19	0.0892	1,338	750,000	43,100	8,082	0.0450	1,160	0.0783	0.0784	0.0786	0.0788	0.0862	0.0872	0.0894	0.0900	0.1568	0.314	0.376	0.206	0.1028	0.0857	
1,113,000	54	3	9	1438	19	0.0862	1,293	700,000	40,200	7,544	0.0435	1,110	0.0839	0.0840	0.0842	0.0844	0.0924	0.0935	0.0957	0.0969	0.1585	0.317	0.380	0.208	0.1040	0.0867	
1,033,500	54	3	9	1384	7	0.0834	1,246	650,000	37,100	7,019	0.0420	1,060	0.0903	0.0905	0.0907	0.0909	0.0994	0.1005	0.1025	0.1033	0.1603	0.321	0.385	0.211	0.1053	0.0878	
954,000	54	3	9	1339	7	0.0806	1,196	600,000	34,200	6,470	0.0403	1,010	0.0979	0.0980	0.0982	0.0984	0.1073	0.1084	0.1118	0.1128	0.1644	0.325	0.390	0.214	0.1068	0.0889	
900,000	54	3	9	1291	7	0.0777	1,162	560,000	32,300	6,112	0.0391	970	0.104	0.104	0.104	0.104	0.1145	0.1155	0.1175	0.1185	0.1660	0.328	0.393	0.216	0.1078	0.0900	
874,500	54	3	9	1273	7	0.0773	1,146	550,000	31,400	5,940	0.0389	950	0.107	0.107	0.107	0.108	0.1188	0.1198	0.1218	0.1228	0.1668	0.329	0.395	0.217	0.1083	0.0903	
795,000	54	3	9	1214	7	0.0744	1,093	500,000	28,500	5,399	0.0368	900	0.117	0.118	0.118	0.119	0.1288	0.1298	0.1328	0.1338	0.1678	0.334	0.401	0.220	0.1100	0.0917	
795,000	26	2	9	1749	7	0.1360	1,108	500,000	31,200	5,770	0.0375	900	0.117	0.117	0.117	0.117	0.1288	0.1288	0.1288	0.1288	0.1660	0.332	0.399	0.219	0.1095	0.0915	
795,000	30	3	9	1628	19	0.0977	1,140	500,000	38,400	6,517	0.0393	910	0.117	0.117	0.117	0.117	0.1288	0.1288	0.1288	0.1288	0.1637	0.337	0.393	0.217	0.1085	0.0904	
715,500	54	3	9	1154	7	0.1151	1,035	450,000	26,300	4,859	0.0349	850	0.131	0.131	0.131	0.132	0.1442	0.1452	0.1472	0.1482	0.1697	0.339	0.407	0.224	0.1119	0.0932	
715,500	26	2	9	1659	7	0.1290	1,021	450,000	28,100	5,193	0.0350	840	0.131	0.131	0.131	0.131	0.1442	0.1442	0.1442	0.1442	0.1667	0.337	0.405	0.223	0.1114	0.0929	
715,500	30	3	9	1544	19	0.0928	1,051	450,000	34,600	5,865	0.0372	840	0.131	0.131	0.131	0.131	0.1442	0.1442	0.1442	0.1442	0.1664	0.333	0.399	0.221	0.1104	0.0920	
666,600	54	3	9	1111	7	0.1111	1,000	419,000	24,500	4,527	0.0337	800	0.140	0.140	0.141	0.141	0.1541	0.1571	0.1591	0.1601	0.1715	0.343	0.412	0.226	0.1132	0.0943	
636,000	54	3	9	1085	7	0.1085	0.977	400,000	23,600	4,319	0.0329	770	0.147	0.147	0.148	0.148	0.1618	0.1628	0.1628	0.1628	0.1718	0.345	0.414	0.228	0.1140	0.0950	
636,000	26	2	9	1564	7	0.1216	0.990	400,000	25,000	4,616	0.0335	780	0.147	0.147	0.147	0.147	0.1618	0.1618	0.1618	0.1618	0.1718	0.344	0.412	0.227	0.1135	0.0945	
636,000	30	3	9	1450	19	0.0874	1,019	400,000	31,500	5,213	0.0351	780	0.147	0.147	0.147	0.147	0.1618	0.1618	0.1618	0.1618	0.1718	0.340	0.405	0.225	0.1123	0.0937	
603,000	54	3	9	1050	7	0.1050	0.953	380,500	22,500	4,100	0.0321	750	0.154	0.155	0.155	0.155	0.1695	0.1715	0.1735	0.1745	0.1873	0.348	0.417	0.230	0.1149	0.0955	
603,000	26	2	9	1523	7	0.1189	0.966	380,500	24,100	4,391	0.0327	760	0.154	0.154	0.154	0.154	0.1700	0.1720	0.1720	0.1720	0.1873	0.346	0.415	0.229	0.1144	0.0953	
559,800	26	2	9	1463	7	0.1138	0.927	350,000	22,400	4,039	0.0313	730	0.168	0.168	0.168	0.168	0.1859	0.1859	0.1859	0.1859	0.1751	0.350	0.420	0.232	0.1150	0.0960	

**Tabla 5.2:** Valores de la resistencia de un cable de aluminio reforzado en acero con conductores de una sola capa

Fuente: (G.Fink, H.Wayne Beaty, & John M.Carroll, 1981)

El modelo anterior no es excesivamente realista. La razón de ello es que la velocidad de propagación de una onda en una línea es próxima a la de la luz, de modo que en una línea de, por ejemplo, 100 km, el tiempo de viaje de la onda en la línea es

$$v = \frac{L}{c} = \frac{100 \text{ km}}{300.000 \text{ km/s}} = 3,33 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad (5.1)$$

Teniendo en cuenta que en una onda de 50 Hz el período es de 20 ms, en el trayecto de ida y vuelta de la onda viajera ( $6,66 \cdot 10^{-4}$  s) apenas han transcurrido

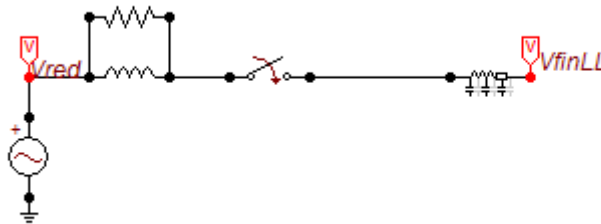
$$\theta = 6,66 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{360}{20 \cdot 10^{-3}} = 12^\circ \quad (5.2)$$

Esta variación del ángulo de fase de la tensión es lo suficientemente importante como para tener que considerar que la fuente es de corriente alterna.

Por esa razón se realizó una segunda simulación considerando que la fuente es una fuente de corriente alterna con una impedancia interna de tipo inductivo.

### **5.2.2 Modelo de energización de una línea larga en vacío con fuente de corriente alterna**

En el caso de estar la línea alimentada por una fuente de tensión alterna hay que tener en cuenta que el valor de la onda que se origina tras la conexión depende del instante en el cual se produce el cierre del disyuntor. Realizaremos las simulaciones ahora variando el valor del instante de maniobra y manteniendo los demás valores del circuito constantes.



**Figura 5.2:** Modelo de energización de una línea larga en vacío con fuente de tensión a corriente alterna

De nuevo, los valores del circuito se han tomado de [Mar07] con objeto de validar los resultados de la simulación. Para este caso, la resistencia de la línea también permanece constante y el valor se ha tomado de [Mar07]. Se coloca una resistencia de valor elevado, donde en este caso damos el valor de  $10.000 \Omega$ , en paralelo con la bobina para amortiguar los picos de tensión que puedan producirse a lo largo de la línea. Los valores del nuevo circuito se muestran en la tabla 5.3.

Impedancia característica de la línea [ $\Omega$ ]	350
Longitud de la línea [km]	900
Resistencia de la línea [ $\frac{\Omega}{\text{km}}$ ]	0.25
Inductancia de la fuente [mH]	0.2

**Tabla 5.3:** Valores de los elementos del circuito en la energización de una línea larga alimentada por una fuente de corriente alterna

### **5.3. MODELO DE ENERGIZACIÓN DE UNA LÍNEA TRIFÁSICA CON TRANSFORMADOR TRIFÁSICO AL FINAL DE LA LÍNEA**

Se realizará una simulación a un modelo de una línea trifásica finalizada por un transformador trifásico. Todo ello está alimentado también de una fuente trifásica.

Para esta simulación el transformador elegido dentro de las posibilidades de ATPDraw es el modelo BCTRAN. Este transformador está basado en la representación matricial y su comportamiento es totalmente fiable y acertado para valores de frecuencia inferiores a 1kHz (Correa, 1995)

En el transformador elegido (con conexión YNyn) el lado de alta tensión es de 230 kV y el de baja de 71kV. La potencia asignada es de 150 MVA y la refrigeración es de tipo ONAN/ONAF. Para implementar el transformador en ATPDraw son necesarios los datos tanto del ensayo de cortocircuito como del ensayo en vacío del transformador. Estos se muestran en la tabla 5.4 y 5.5 respectivamente.

Los datos del ensayo de cortocircuito:

<b>Alimentado</b>	<b>U Nominal Terminal Alimentado [kV]</b>	<b>Pérdidas [kW]</b>	<b>Impedancia [%]</b>
11	230	429.91	14.11

**Tabla 5.4.** Datos del ensayo de cortocircuito del transformador trifásico

El ensayo en vacío se realiza y conecta en el lado de baja tensión y los valores son:

<b>Tensión [%]</b>	<b>Intensidad [%]</b>	<b>Pérdidas [kW]</b>
100	0.059	54.55

**Tabla 5.5.** Datos del ensayo en vacío del transformador trifásico

La interfaz que despliega ATPDraw se presenta en la figura 5.3:

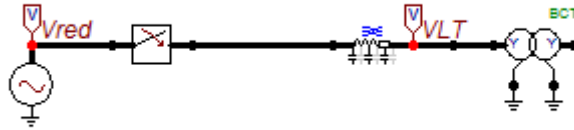
**Figura 5.3:** Ventana principal del modelo BCTRAN en ATPDraw

La fuente trifásica es de 230 kV y los datos de la línea trifásica se muestran en la tabla 5.6.

Impedancia característica de la línea de secuencia directa e inversa [ $\Omega$ ]	350
Impedancia característica de la línea de secuencia homopolar [ $\Omega$ ]	1050
Longitud de la línea [km]	100
Resistencia de la línea [ $\frac{\Omega}{km}$ ]	0
Velocidad de propagación de las ondas de la línea [ $\frac{km}{s}$ ]	300.000

**Tabla 5.6:** Valores de los elementos del circuito de energización de una línea trifásica con transformador trifásico al final de la línea

El circuito completo que se implementa en ATPDraw se re presenta en la figura 5.4:



**Figura 5.4:** Modelo de energización de una línea trifásica acabada con un transformador trifásico

Con este circuito se realizan las primeras simulaciones empleando el modelo de transformador en ATPDraw. Estas simulaciones sirven para familiarizarse con el modelo del transformador, y cerciorarse de que es el adecuado para emplear en las simulaciones finales.

Para entender su comportamiento se hacen comprobaciones variando el valor de las pérdidas del transformador. Se comprobará el efecto en la energización de la línea de conectar un transformador con mayor o menor pérdidas.

## **5.4. MODELO DE PARARRAYOS**

### ***5.4.1 Selección del pararrayos***

En este apartado se realiza el diseño del pararrayos (SIEMENS, 2014). El pararrayos en ATPDraw se representa mediante el módulo MOV. Como se explicó en el apartado 4.3.5. (Módulos del tipo de pararrayos empleado), el módulo MOV responde a la ecuación:

$$i = I_{ref} \cdot \left( \frac{u}{V_{ref}} \right)^q \quad (5.3)$$

Como se indicó en el apartado 4.3.5 la curva no lineal de funcionamiento del pararrayos no se genera indicando los valores de p y de q, sino que estos valores p y q se obtienen ajustando una curva introducida por puntos. También se indicó que los parámetros p y q mencionados se obtienen de mediante un ajuste por mínimos cuadrados en el dominio log-log dividido en un cierto número de segmentos que depende de la tolerancia que se haya admitido para el ajuste (ErrLim).

Sin embargo, en este Trabajo Fin de Grado no se dispone de la curva de actuación del pararrayos definida por puntos, por lo que se ha seguido el camino inverso: se ha tomado un valor de la corriente de referencia,  $I_{ref}$ , de 10 kA (valor típico normalizado) y un coeficiente de no linealidad, q, de 26. El valor de  $V_{ref}$  se tomó siguiendo las indicaciones del ATP Rule Book (Group, 1982-92) que dice que la tensión de referencia es en torno al doble de la tensión del elemento que se quiere proteger, en este caso el transformador, por lo que se ha tomado un valor de 266 kV

$$2 \cdot \frac{230}{\sqrt{3}} = 266 \text{ kV} \quad (5.4)$$

Para calcular la curva característica tensión corriente se despeja en la ecuación (5.3) y queda:

$$u = V_{ref} \cdot \left( \frac{i}{I_{ref}} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (5.5)$$

Para obtener los valores de tensión de la curva que se precisa introducir en el módulo MOV se ha implementado la ecuación (5.5) en una hoja de cálculo y se ha dado a la corriente valores arbitrarios comprendidos entre 2.500 A y 60.000 A. De esta manera se ha obtenido la curva característica del pararrayos mostrada en la figura 5.5.

### **CURVA CARACTERÍSTICA DEL PARARRAYOS**

Tensión [kV]	Corriente [A]
252	2.500
259	5.000
266	10.000
273	20.000
277	30.000
280	40.000
283	50.000
285	60.000

Datos	
Vref [kV]	266
Iref	10.000
q	26

**Figura 5.5:** Datos de la curva característica del pararrayos

Una vez obtenida la curva característica diseñamos el pararrayos en ATPDraw. La interfaz del módulo MOV consta de dos pestañas.

En la primera pestaña introducimos los datos generales: la tensión de cebado del pararrayos, la tensión inicial del pararrayos, el número de columnas en paralelo que dispone el pararrayos, el número de elementos en serie del pararrayos, la tolerancia de la ecuación anterior de la curva del pararrayos y la intensidad límite por debajo de la cual el pararrayos se admite lineal. Estos valores se resumen en la primera pestaña de la interfaz de ATPDraw del modo mostrado en la figura 5.6. Para el ajuste de la curva se ha tomado un valor de la (ErrLim) de 0.05 p.u.

DATA	UNIT	VALUE
Vref	Volts	266000
Vflash	<0: No gap	-1
Vzero	Volts	0
#COL		1
#SER		1
ErrLim	pu	0.05
Ilim	A	0.001

NODE	PHASE	NAME
From	A	TRAFO
To	1	

**Figura 5.6:** Datos generales del diseño del pararrayos en ATPDraw

En la segunda pestaña del módulo MOV del pararrayos se debe introducir la curva característica del pararrayos obtenida en la hoja de cálculo de Excel. Introducimos dichos datos en ATPDraw, como se representa en la figura 5.7:

I [A]	U [V]
2500	252000
5000	259000
10000	266000
20000	273000
30000	277000
40000	280000
50000	283000
60000	285000

**Figura 5.7:** Curva característica del pararrayos en ATPDraw

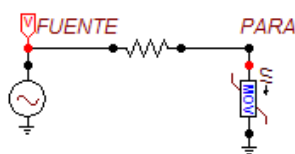


Para comprobar que el diseño del pararrayos es el correcto se procede a realizar un ensayo de prueba del modelo de pararrayos. Se verificará que los resultados son correctos a partir de una práctica de la Universidad de Colombia de Leonardo Cardona Correa (Correa, 1995)

#### **5.4.2 Simulación de prueba del modelo de pararrayos**

Para comprobar el correcto funcionamiento del pararrayos a baja frecuencia se hace el montaje de la figura 5.8.

La finalidad de la resistencia de la figura es limitar la corriente de la fuente a tierra y su valor es de  $3.2\Omega$  (Correa, 1995). El voltaje que se debe asignar a la fuente debe ser suficiente para hacer que el pararrayos actúe, es decir que mínimo se debe llevar al voltaje residual, que para este caso es de 266.000V.



**Figura 5.8:** Circuito para prueba a baja frecuencia del modelo 52 de pararrayos

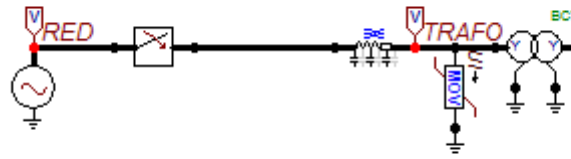
### **5.5. ESTUDIO DEL SISTEMA ANTE SOBRETENSIONES DE TIPO MANIOBRA**

Las ondas de maniobra en los sistemas de potencia se originan por cambios súbitos en la configuración del sistema tales como la operación de interruptores o la iniciación de una falta, que producen un escalón de tensión o una inyección de corriente que se aplica en los sistemas.

En este Trabajo de Fin de Grado se ha analizado el caso de sobretensiones de tipo maniobra de una línea de transmisión finalizada por un transformador, cuyo lado de alta tensión se encuentra protegido por un pararrayos.

Para realizar este estudio se emplean los modelos que se han diseñado en los apartados anteriores. Al modelo de línea trifásica finalizada por transformador trifásico estudiada en el apartado 5.3 se le añade la protección mediante el pararrayos diseñado en el apartado 5.4.

De esta forma, el circuito que se implementa en ATPDraw es el mostrado en la figura 5.9:



**Figura 5.9:** Circuito del estudio ante sobretensiones de tipo maniobra

## **5.6. ONDA TIPO RAYO**

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es analizar el comportamiento del sistema tanto ante sobretensiones de tipo maniobra como ante sobretensiones de origen atmosférico. Para ello es necesario crear la onda tipo rayo.

Un impulso de tipo rayo es una corriente transitoria aperiódica aplicada en un punto de la línea que habitualmente crece rápidamente hasta alcanzar un valor de cresta, y después decrece más lentamente hasta cero.

Para tener una guía de diseño, se establecen cuatro tipos de rayo que se presentan en la tabla 5.7. Los distintos tipos de rayos son los correspondientes a las columnas 90, 50 y 10%, y máximo observado (bajo, típico, alto y extremo)

Parámetro	90% (bajo)	50% (típico)	10% (alto)	Máximo observado (extremo)
Corriente de pico	2 a 8 kA	10 a 25 kA	40 a 60 kA	230 kA
Velocidad de ascenso de la corriente (di/dt)	2 kA/μs	8 kA/μs	25 kA/μs	50 kA/μs
Duración total del rayo	0,01 a 0,1 s	0,1 a 0,3 s	0,5 a 0,7 s	1,5 s
Duración de un simple impulso o descarga	0,1 a 0,6 ms	0,5 a 3 ms	20 a 100 ms	400 ms
Intervalo de tiempo entre impulsos	5 a 10 ms	30 a 40 ms	80 a 130 ms	500 ms
Intervalo de tiempo entre el principio y la mitad del valor de pico en el lado de caída	10 a 25 μs	28 a 42 μs	52 a 100 μs	Más de 120 μs
Tiempo hasta el valor de pico	0,3 a 2 μs	1 a 4 μs	5 a 7 μs	10 μs
Número de impulsos o descargas en un rayo individual	1 a 2	2 a 4	5 a 11	34

**Tabla 5.7:** Parámetros característicos de cuatro tipos de rayos tipificados (bajo, típico, alto y extremo)

*Fuente:* (Electric, 2008)

El estudio se realizará frente a un tipo de rayo típico (columna del 50% de la tabla 5.6). Como se indicó anteriormente, un impulso de tipo rayo puede ser modelado en ATPDRAW mediante una fuente de corriente “Heidler type 15”. Empleando el tipo de onda de rayo 10 kA, 8/20  $\mu$ s debemos introducir los datos mostrados en la figura 5.10 en ATPDraw.

DATA	UNIT	VALUE
Amplitude	Ampere	10000
T_f	s	8E-6
tau	s	2E-5
n		2
T_start	s	0
T_stop	s	1000

NODE	PHASE	NAME
HEI	1	XX0001

**Figura 5.10:** Fuente Heidler para impulso tipo rayo

Para este tipo de dimensionado del rayo, el circuito que se implementa en ATPDraw para la visualización de la onda tipo rayo es el mostrado en la figura 5.11:



**Figura 5.11:** Circuito del estudio para dimensionado de rayo con fuente tipo impulso

## **5.7. ESTUDIO DE SOBRETENSIONES ATMOSFÉRICAS CON DOS MODELOS DE TRANSFAMADOR DISTINTO**

En este apartado se realiza el modelo final del circuito eléctrico al cual se le realiza un estudio de sobretensiones de origen atmosférico. Para realizar este circuito del sistema completo se emplean los distintos diseños presentados en los anteriores apartados de este Trabajo de Fin de Grado.

Cuando se llega a este punto del estudio del sistema completo se tiene una mayor agilidad con ATPDraw y un mayor conocimiento de sus posibilidades y modelos. Hemos realizado un estudio individual de los distintos componentes de este sistema completo y uno de los elementos más importantes es el transformador. Se ha trabajado con el transformador trifásico-BCTAN- y se realizará un estudio con éste, pero se conoce que el modelo del transformador Híbrido (HYBRID en ATPDraw presentado en el apartado 4.3.4. Módulos del tipo de transformador empleado) cuando fue diseñado pretendía cubrir las carencias de los modelos anteriores en cuanto a respuesta frente a los fenómenos transitorios, por lo que realizaremos también un estudio final de una línea de transmisión trifásica finalizada por un transformador híbrido (**Sánchez, 2012**).

A continuación se presentarán en diferentes subapartados las características comunes del estudio de los dos modelos, el estudio con línea finalizada por transformador trifásico y el estudio para la línea finalizada por transformador híbrido.

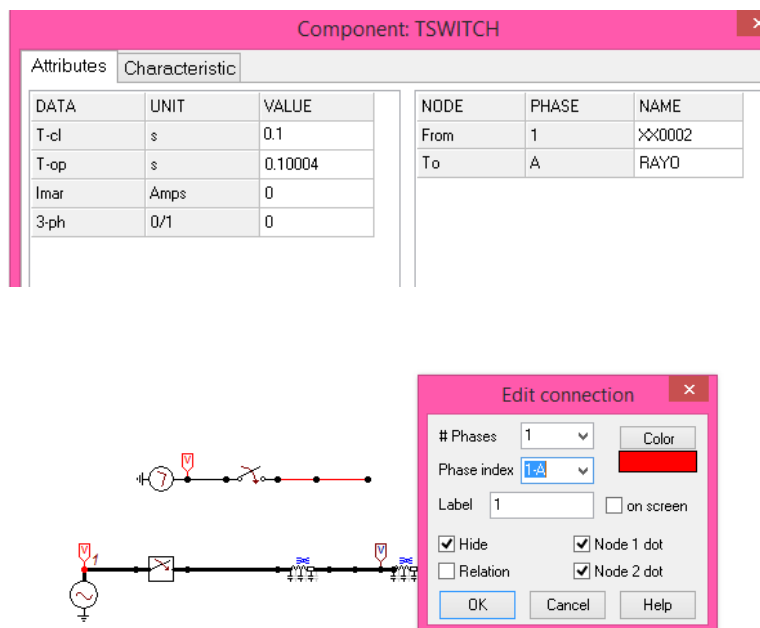
### ***5.7.1. Características comunes de los dos modelos***

#### ***5.7.1. A) Conexión para la caída del rayo***

Para simular la caída del rayo (10 kA, 8/20  $\mu$ s) creado en el apartado 5.6. en el circuito correspondiente a cada uno de los siguientes apartados hay que tener en cuenta que se trabaja con un modelo monofásico, que es el rayo, y un modelo trifásico, que es la línea de transmisión.

La fuente de corriente que modela el rayo se conecta directamente a la fase afectada, pues se trata de simular un fallo de apantallamiento sobre una de las fases. Para ello en ATPDraw el interruptor que con su cierre da lugar a la caída del rayo en el sistema se debe diseñar como monofásico. Además debemos hacer click en éste y elegir a qué fase de la línea trifásica se quiere inyectar el rayo.

En la figura 5.12 se muestra el ejemplo de cómo debe realizarse esta conexión, donde se inyecta el rayo a la fase A de la línea trifásica:



**Figura 5.12:** Conexión de sistemas monofásicos a una red trifásica

Se comprueba en la figura superior como el interruptor está a cero en la casilla 3-ph (interruptor monofásico) y cómo al editar la conexión seleccionamos un conexionado del rayo con la fase A de la línea de transmisión trifásica.

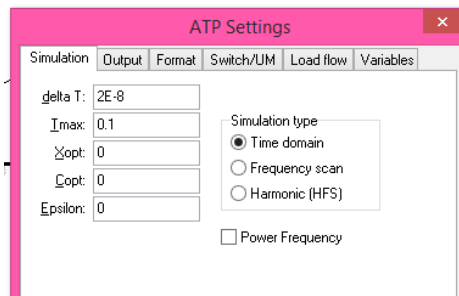
También se aprovecha la figura superior 5.12 referida al interruptor del conexionado del rayo, para indicar que la duración de la caída del rayo en todas las simulaciones para el estudio de sobretensiones atmosféricas es de  $40\mu s$ . La duración del rayo inyectado en la fase A de la línea trifásica se puede elegir en ATPDraw dando valores de apertura y cierre al interruptor monofásico que lleva asociado la fuente de tipo impulso que modelo este rayo.

### 5.7.1. B) Intervalo de integración

Debido a que los tiempos involucrados en los fenómenos atmosféricos son muy pequeños, del orden de  $0,2\ \mu s$  en algunos casos, se considera en el estudio un intervalo de integración 10 veces menor, es decir, de 20 ns. Además el periodo de simulación también debe aumentar para que el programa pueda realizar un correcto estudio.

Es preciso cambiar dichos datos en la pestaña "ATP Settings" donde realizamos un cambio en el fichero LISTSIZE.DAT que es el que dimensiona las tablas que usa el ATP para almacenar los datos que describen el sistema que se va a simular.

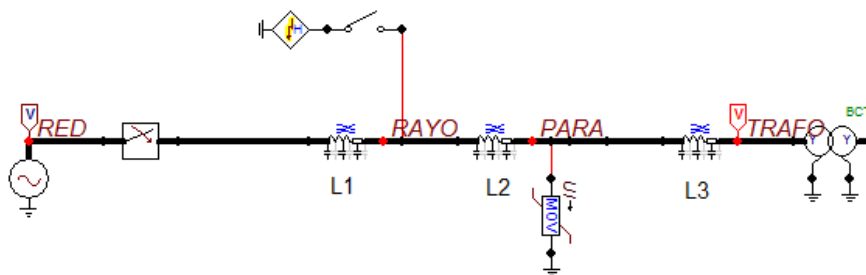
En la figura 5.13 se muestra la ventana de la interfaz de ATPDraw en la que debe crearse el intervalo de integración característico a este estudio:



**Figura 5.13:** Intervalo de integración para el estudio de sobretensiones de tipo atmosféricas

### ***5.7.2. Modelo 1: Efecto del pararrayos en una línea trifásica finalizada por transformador trifásico (BCTran)***

El circuito que se implementa en ATPDraw para el estudio de las sobretensiones de tipo atmosféricas en una línea trifásica finalizada por un transformador trifásico (BCTran) se representa en la figura 5.14:



**Figura 5.14:** Circuito completo para el estudio de sobretensiones atmosféricas en una línea trifásica finalizada por transformador trifásico

Para realizar las simulaciones de este estudio se monta un circuito con los módulos estudiados en los apartados anteriores. Se conectará al final de la línea de transmisión trifásica el transformador trifásico (BCTran) diseñado en el apartado 5.3, el pararrayos diseñado en el apartado 5.4 y se inyectará el rayo (10 kA, 8/20  $\mu$ s) creado en el apartado 5.6. En cuanto a la línea de transmisión trifásica será de las mismas características que las empleadas en el estudio de apartados anteriores. Como se puede ver en la figura 5.14 la línea trifásica queda dividida en 3 al caer el rayo y colocar el pararrayos a una cierta distancia del transformador. Esto queda representado según L1, L2 Y L3 cuyas longitudes son 50km para las dos primeras y 25m para L3.

Con el diseño de este circuito se realiza en el capítulo 6 el estudio de las sobretensiones en el transformador tras la inyección del rayo, así como del comportamiento del pararrayos ante esta situación atmosférica.

### **5.7.3. Modelo 2: Efecto del pararrayos en una línea trifásica finalizada por transformador híbrido (HYBRID)**

En este apartado se procede al diseño del transformador híbrido, denominado HYBRID en la interface de ATPDraw, como una mejora al diseño final que se ha presentado en el apartado anterior.

Como se dijo en apartados anteriores el transformador híbrido incluye cualidades que no tiene el transformador BCTRAN y que resultan muy interesantes para el estudio de sobretensiones, como son poder tener varios arrollamientos (de 2 a 4) o tener en cuenta las capacidades parásitas de los mismos.

Se diseña un transformador con núcleo trifásico y dos arrollamientos en configuración Yy. El lado de alta tensión es de 230kV y el de baja tensión de 71KV. La potencia del transformador en ambos devanados es de 150 MVA. Para el diseño de este transformador también es necesario introducir una serie de valores respecto a la impedancia de secuencia directa del transformador, las capacidades parásitas entre arrollamientos y datos del núcleo. Dicha información se resumen en la tabla 5.8, 5.9 y 5.10

En la tabla 5.8 se presentan los datos que se introducen en ATPDraw según el ensayo de impedancia de secuencia positiva. Estos datos serán los mismos en las pestañas “Inductancia” y “Resistencia” de la interfaz que despliega ATPDraw, la cual se puede visualizar en la figura 5.15.

	<b>Impedancia (%)</b>	<b>Potencia [MVA]</b>	<b>Pérdidas [kW]</b>
<b>P-S</b>	14.11	150	430

**Tabla 5.8:** Valores de la impedancia de secuencia de directa a introducir en ATPDraw para el diseño del transformador Hybrid

En la tabla 5.9 se resumen los valores de las capacidades primario-tierra (P-G), secundario-tierra (S-G) y primario-secundario (P-S) a introducir en ATPDraw.

<b>Conexión</b>	<b>Capacidades [nF]</b>
<i>P-G</i>	4,586
<i>S-G</i>	12,889
<i>P-S</i>	6,79

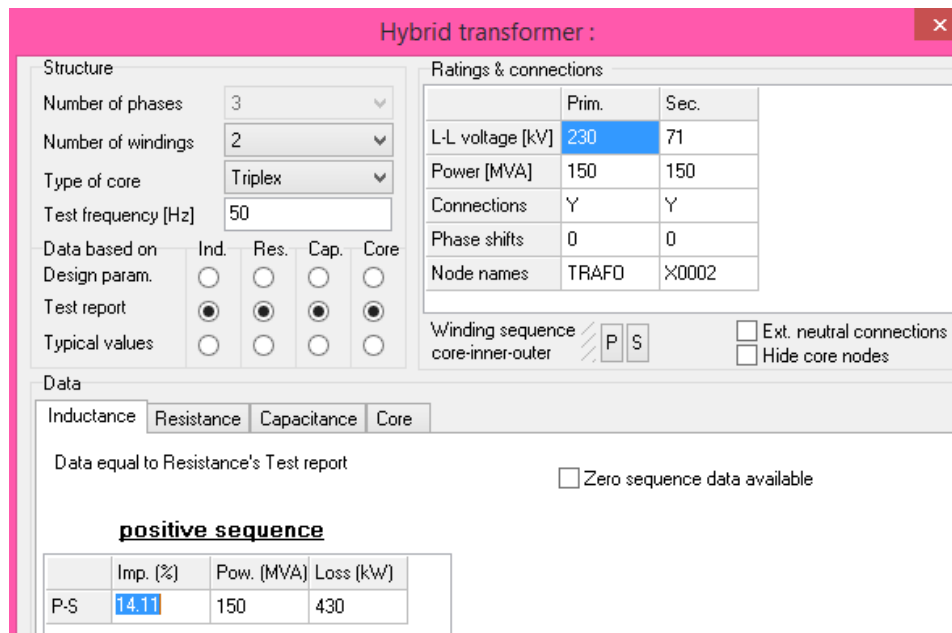
**Tabla 5.9:** Valores de las capacidades existentes entre arrollamientos a introducir en ATPDraw para el diseño del transformador Hybrid

Y finalmente en la tabla 5.10 se muestran los datos referentes al núcleo del transformador para poder completar el diseño del transformador Hybrid:

Tensión [%]	Pérdidas [kW]	I <sub>av</sub> [%]
100	160	0,75

**Tabla 5.10:** Valores referentes al núcleo del transformador a introducir en ATPDraw para el diseño del transformador Hybrid

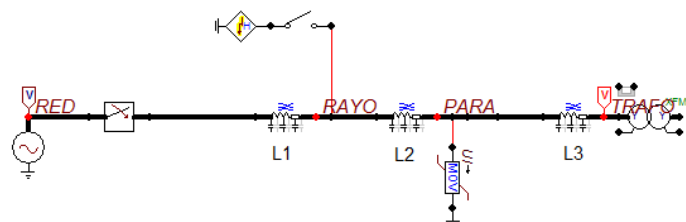
En la figura 5.15 se muestra la interfaz con la que se modela este transformador en ATPDraw según los datos citados en las tres tablas anteriores.



**Figura 5.15:** Diseño del modelo de transformador híbrido en ATPDraw

Para el estudio de las sobretensiones de tipo atmosféricas se implementará el mismo circuito eléctrico que se utilizó para el análisis del apartado anterior, pero se cambiará el transformador BCTRAN por el nuevo transformador híbrido diseñado (HYBRID). Los demás valores del circuito se mantienen constantes.

El nuevo circuito implementado en ATPDraw se presenta en la figura 5.16:



**Figura 5.16:** Circuito completo para el estudio de sobretensiones atmosféricas en una línea trifásica finalizada por transformador híbrido



Con el circuito de la figura 5.16 se realiza un estudio de las sobretensiones que alcanza el nuevo transformador tras la inyección del rayo así como la corriente que drena el pararrayos ante esta situación atmosférica.

## **5.8. COMPARACIÓN DE LOS ESTUDIOS ANTERIORES CON DOS MODELOS MÁS SIMPLIFICADOS**

Las simulaciones planteadas hasta el momento pueden ser implementadas en un ordenador para obtener las sobretensiones que alcanzan el transformador y la corriente drenada por el pararrayos. Sin embargo, para realizar un cálculo a mano, sin la ayuda de un ordenador, se precisa responder a la siguiente pregunta: Para construir un modelo simplificado de línea acabada por un transformador qué merece más la pena: ¿sustituir el transformador por un circuito abierto o sustituirlo por un conjunto de capacidades?

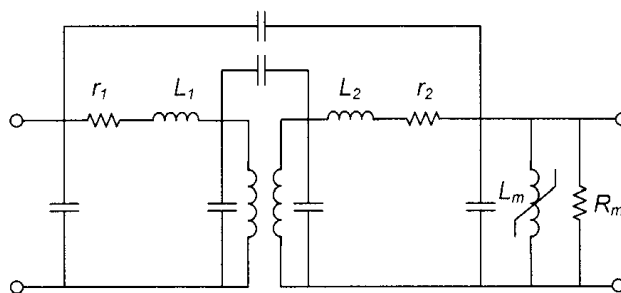
Para responder a esta pregunta en este apartado se realiza una comparación de los dos modelos empleados en el apartado anterior con otros modelos equivalentes pero más simplificados.

### ***5.8.1. Circuito equivalente I: Línea terminada por capacidades parásitas***

En este apartado se pretende mostrar cómo las capacidades parásitas tienen un efecto que no debe ser despreciado en la reflexión de las ondas y que por lo tanto es necesario hacer esta consideración en el diseño del estudio final.

Para realizar esta demostración se empleará un modelo de sistema eléctrico formado por una línea de transmisión trifásica finalizada en un modelo de red  $\pi$ .

Un modelo que únicamente tenga en cuenta dichas capacidades es el mostrado en la figura 5.17 (DAS, 2010):



**Figura 5.17:** Modelo de línea teórico que sólo tiene en cuenta las capacidades parásitas  
Fuente: (DAS, 2010)

El estudio de las sobretensiones que se tienen en una línea finalizada por un condensador se puede ver en (Andrew.R.Hileman, 1999) y en (Greenwood, 1991).

El coeficiente de reflexión (Greenwood, 1991) vale:

$$\Gamma = \frac{\frac{1}{C_k s} - Z}{\frac{1}{C_k s} + Z} \quad (5.6)$$

Donde Z es la impedancia característica de la línea,  $C_k$  es el valor de la capacidad en el extremo de línea, s el operador de Laplace.

Con lo que la transformada de Laplace de la onda reflejada vale (Andrew.R.Hileman, 1999):

$$e''(s) = \frac{\frac{2}{C_k s}}{Z + \frac{1}{C_k s}} \cdot e(s) \quad (5.7)$$

Siendo  $e(s)$  la transformada de Laplace de la onda primitiva que se propaga por la línea y  $e''(s)$  la transformada de Laplace de la onda reflejada.

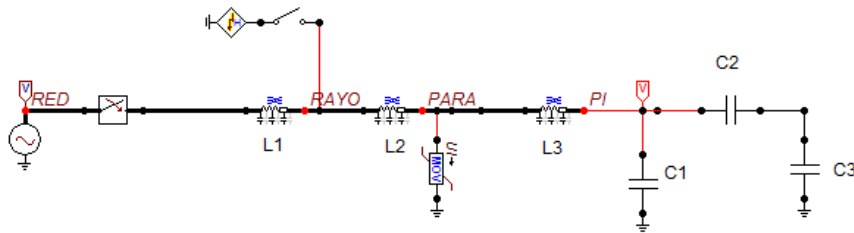
Así, si por la línea de transmisión se propaga un escalón, la onda reflejada vale:

$$e' = E[1 - 2e^{-\left(\frac{1}{Z\lambda_k}\right)}] \quad (5.8)$$

Y la tensión en bornas del transformador (suma de la onda incidente y reflejada vale:

$$e'' = 2E[1 - 2e^{-\left(\frac{1}{ZC_k}\right)}] \quad (5.9)$$

En la figura 5.18 se muestra el circuito que se implementa en ATPDraw para este estudio:



**Figura 5.18:** Circuito empleado para la comprobación del efecto en la reflexión del onda de las capacidades parásitas en el diseño de estudio final

En este modelo  $\pi$  se incluirán los valores de las capacidades especificadas en la tabla 5.9 para el transformador híbrido, siendo  $C_1$  la capacidad entre el arrollamiento de A.T. y la cuba del transformador,  $C_2$  la capacidad entre el arrollamiento de A.T. y el arrollamiento de B.T. y  $C_3$  la capacidad entre el arrollamiento de B.T. y el núcleo magnético.

Para el transformador objeto de estudio, del protocolo de ensayos en fábrica se obtiene  $C_1 = 4,586 \text{ nF}$   $C_2 = 6,79 \text{ nF}$  y  $C_3 = 12,889 \text{ nF}$

Para esta simulación la longitud de las líneas siguen siendo iguales a las del apartado 5.7 siendo el valor de  $L_1=L_2=50\text{km}$  y la longitud de  $L_3=25\text{m}$ . La duración de la inyección del rayo a la línea sigue siendo  $40\mu\text{s}$ .

En el capítulo de resultados (6.7.1) se podrán visualizar los resultados de sobretensiones obtenidos en esta simulación. Se realizará un estudio de dichos resultados y se compararán con los obtenidos en los modelos del apartado anterior.

Realizando este análisis se verifica si un circuito compuesto únicamente por capacidades parásitas es el circuito simplificado equivalente al circuito formado por una línea de transmisión trifásica finalizada por transformador híbrido.

### ***5.8.2. Circuito equivalente II: Línea terminada en un extremo abierto***

El circuito equivalente del modelo BCTRAN sólo considera resistencias e inductancias.

Cuando una línea está terminada por una inductancia la corriente no puede penetrar instantáneamente. Cuando la onda llega a este terminal la inductancia se comporta en los primeros instantes como un circuito abierto. En este caso la onda reflejada vale \_

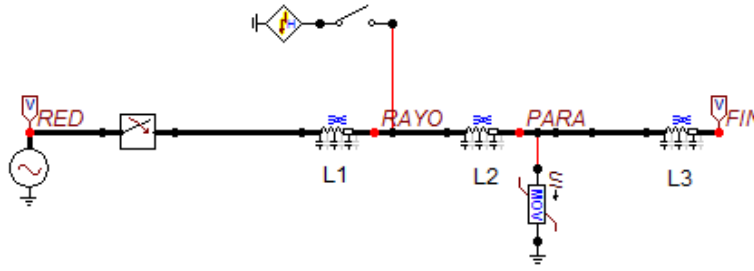
$$e''(s) = e(s) \frac{s - \frac{Z}{L}}{s + \frac{Z}{L}} \quad (5.10)$$

Cuando el transformador se encuentra en vacío la impedancia que se ofrece a la red es fundamentalmente la inductancia magnetizante del transformador. Cuando  $L \gg Z$ , como es el caso de un transformador en vacío,  $Z/L \approx 0$  con lo que:

$$e''(s) = e(s) \quad (5.11)$$

Como ocurre cuando la línea está terminada por un circuito abierto. Por tanto es de esperar que los resultados obtenidos utilizando el modelo BCTRAN sean semejantes a los que se obtendrían terminando la línea con un circuito abierto.

En la figura 5.19 se presenta el circuito que se implementa en ATPDraw para la realización del estudio de la caída de un rayo en una línea de terminación abierta, siendo los valores de los distintos componentes idénticos a los del apartado anterior.



**Figura 5.19:** Circuito implementado en ATPDraw para la comparación del comportamiento del transformador como circuito abierto

De igual forma que en el apartado anterior, en el capítulo de resultados (capítulo 6.7.2) se analizan los resultados obtenidos en la simulación del circuito de la figura 5.19 y se realiza una comparación de dichos resultados con los resultados del estudio de sobretensiones atmosféricas en la línea finalizada por transformador trifásico e híbrido.

Realizando este análisis se verifica si un circuito compuesto por una línea de terminación abierta es el circuito simplificado equivalente al circuito formado por una línea de transmisión trifásica finalizada por transformador trifásico.

## **5.9. EFECTO DE LA DISTANCIA DEL PARARRAYOS AL TRANSFORMADOR**

Los pararrayos disponen de una respuesta de cebado más rápida que la de perforación de aislamiento del elemento que protegen. La respuesta que éste realiza ante la tensión es prácticamente independiente de la inclinación del frente de onda.

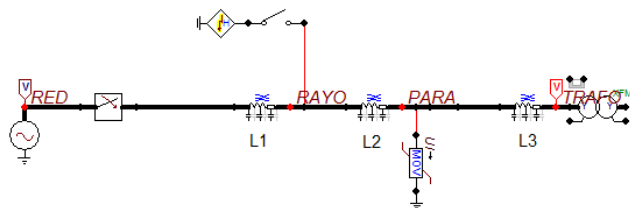
Las conexiones del pararrayos a la línea se efectuarán en el lado de la entrada del mismo y lo más cerca posible del elemento a proteger. Teóricamente Martínez Velazco (Velasco, 2007): *“Cuanta más separación existe entre el pararrayos y el transformador más grande es la sobretensión resultante en el transformador”*. Esto es así que a menudo, se montan los pararrayos en las cubas de los transformadores que protegen, o en cabinas metálicas cuando su finalidad es la protección de equipos de maniobra o máquinas rotativas. (G.Fink, H.Wayne Beaty, & John M.Carroll, 1981)

En este apartado se realizará un estudio del efecto que provoca la distancia entre el pararrayos y el elemento a proteger, en este caso, el transformador híbrido que resulta ser el modelo más idóneo para las simulaciones de sobretensiones atmosféricas según los estudios realizados en apartados anteriores.

Se realizarán simulaciones variando la distancia entre el pararrayos y el transformador con la que se ha partido en los apartados anteriores, 25 metros.

En la primera simulación de este apartado se aumenta la distancia pararrayos-transformador a 200 metros y se comprueba gráficamente que aumentan las sobretensiones en el transformador.

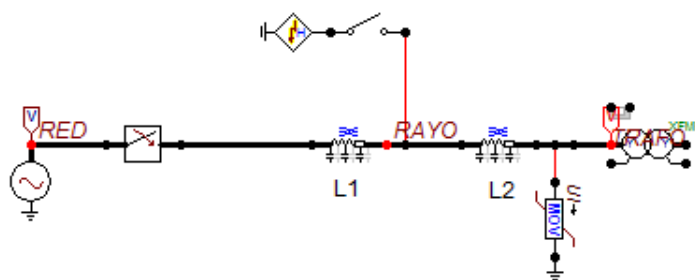
Para este estudio se implementa el circuito de la figura 5.20 donde la longitud de las líneas es  $L1=L2=50$  km y varía la longitud de  $L3$  teniendo un valor de 200m. La duración de la inyección del rayo a la línea sigue siendo de  $40 \mu s$ .



**Figura 5.20:** Circuito completo para el estudio de sobretensiones atmosféricas cuando la distancia pararrayos-transformador es de 200 metros

Una segunda simulación para el estudio de este efecto es colocar el pararrayos en bornas del transformador y comprobar así la teoría expuesta en (Velasco, 2007). Para este estudio se la línea de transmisión queda dividida únicamente en dos, pues  $L3$  desaparece al colocarlo en bornas del lado de alta tensión del transformador.

El circuito empleado en ATPDraw para el estudio del pararrayos en bornas del transformador ante sobretensiones de tipo atmosférico se presenta en la figura 5.21:



**Figura 5.21:** Circuito completo para el estudio de sobretensiones atmosféricas cuando el pararrayos se encuentra situado en bornas del lado de AT del transformador

# *Capítulo 6*

## RESULTADOS OBTENIDOS

---

## 6.1. RESULTADOS TRAS LA ENERGIZACIÓN DE UNA LÍNEA LARGA EN VACÍO.

### 6.1.1. Análisis teórico

Sólo se realizará el análisis teórico en el caso simple de energización de una línea larga sin resistencia desde una fuente de corriente continua (figura 6.1).

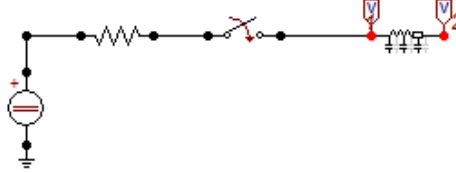


Figura 6.1. Modelo de energización de una línea larga en vacío

La fuente de alimentación tiene una impedancia interna,  $R_F$ , por eso existirá una cierta caída de tensión en dicha impedancia y la tensión aguas arriba del interruptor,  $u_1$ , no coincidirá con la tensión interna de la fuente  $E$ .

Para obtener la tensión aguas arriba del interruptor, supuesto el interruptor cerrado, escribimos las ecuaciones de la fuente y las ecuaciones de la línea.

La fuente es un circuito de parámetros concentrados, y en ella se cumple:

$$u_1 = E - R_F i_1 \quad (6.1)$$

La línea larga es un circuito de parámetros distribuidos, y en ese circuito se cumple:

$$u_1 = Z_c i_1 \quad (6.2)$$

Siendo  $Z_c$  la impedancia característica de la línea,

Si de las ecuaciones (6.1) y (6.2) eliminamos la corriente queda:

$$u_1 = \frac{Z_c}{R_F + Z_c} E \quad (6.3)$$

La tensión  $u_1$  aplicada al principio de la línea viaja hasta el final de la misma, y dado que el final de la misma está a circuito abierto el coeficiente de reflexión de la onda será:

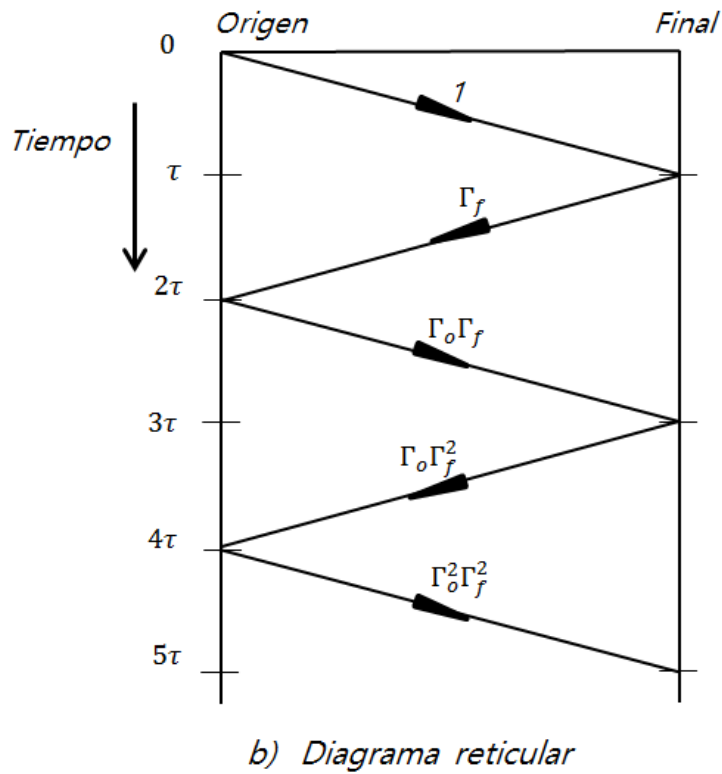
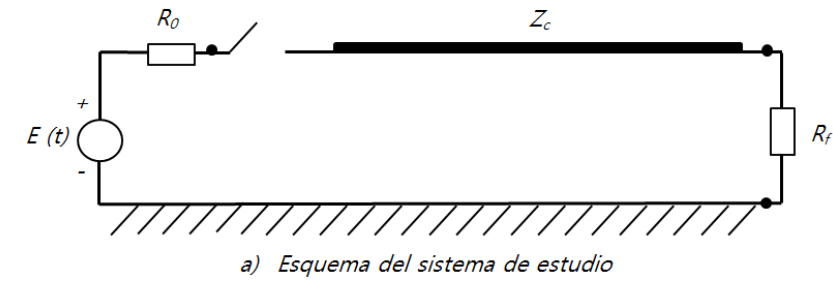
$$\Gamma_f = \frac{\infty - Z_c}{\infty + Z_c} = 1 \quad (6.4)$$

Esto es, la onda sufre una reflexión total.

Cuando la onda reflejada  $u_2$  llega al principio de la línea la onda sufre una reflexión con un coeficiente de reflexión:

$$\Gamma_0 = \frac{R_F - Z_c}{R_F + Z_c} \quad (6.5)$$

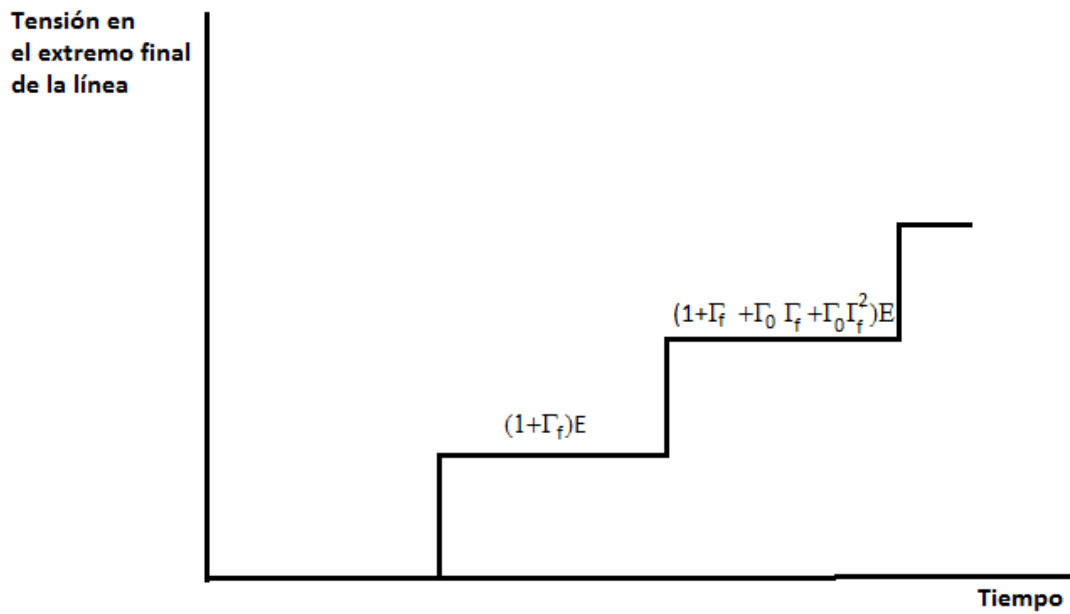
El diagrama de reflexiones de onda de este caso se muestra en la figura 6.2.



**Figura 6.2:** Modelo de energización de una línea larga en vacío

La tensión al principio de la línea en cada instante se obtiene como suma de las ondas que hasta el instante considerado han llegado a ese punto. Idem en el extremo final de la línea.





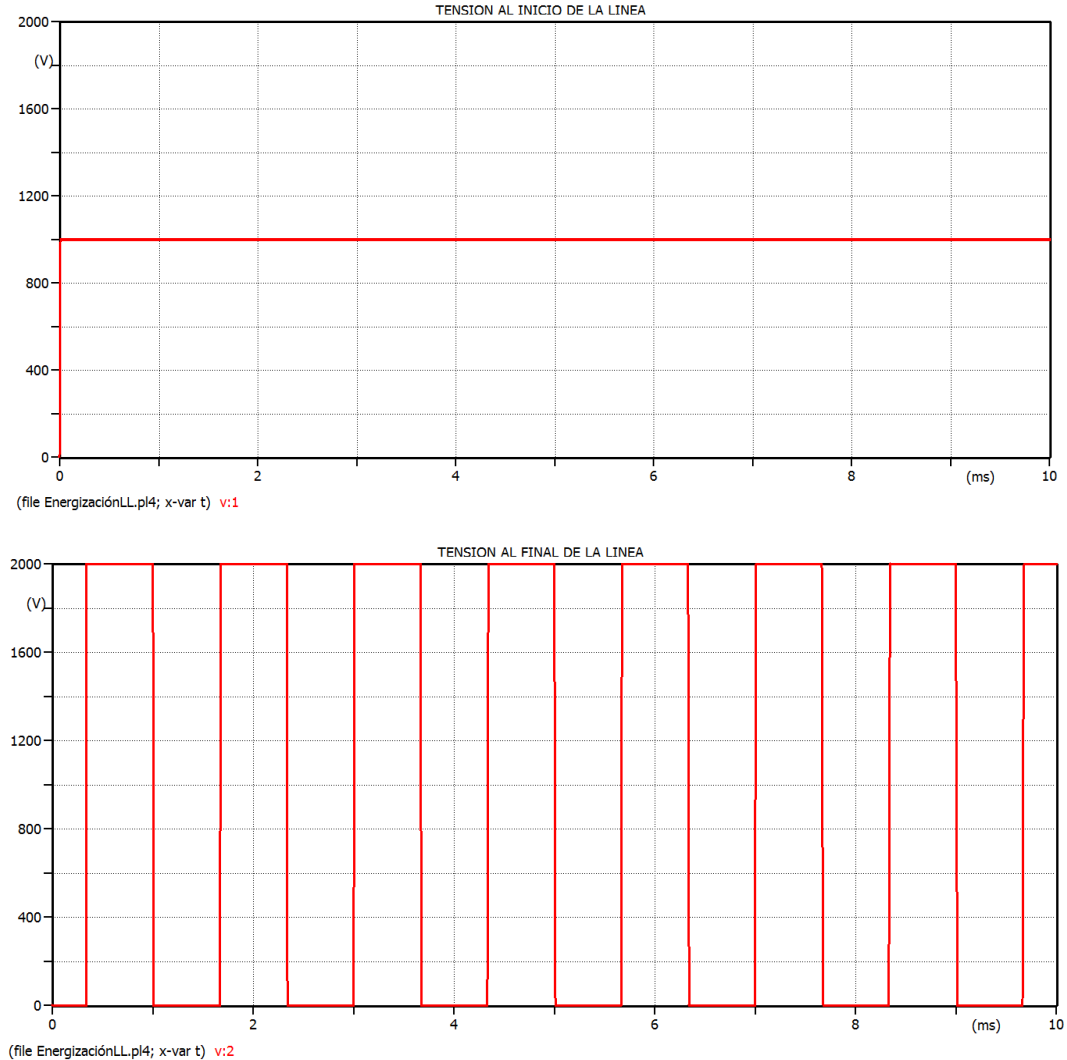
**Figura 6.3:** Diagrama de tensión en el extremo final de la línea

El valor de  $\Gamma_0$  puede ser negativo en el caso en el que la resistencia interna de la fuente sea menor que la impedancia característica de la línea, en cuyo caso en la figura 6.3 el segundo escalón de tensión sería negativo.

Para el caso particular de  $R_f=0$  el valor de  $\Gamma_0=-1$  y la tensión en el extremo final de la línea se convierte en un tren de pulsos con un valor máximo  $2E$  y un valor mínimo  $0\text{ V}$ .

### 6.1.2. Caso de fuente de alimentación en corriente continua

En la figura 6.4 se muestran los resultados obtenidos por simulación con ATPDraw en el caso más simple de energización de una línea de resistencia despreciable a partir de una fuente de resistencia despreciable.



**Figura 6.4:** Energización de una línea larga a partir de una fuente de corriente continua.  
Figura superior: tensión al inicio de la línea, figura inferior tensión al final

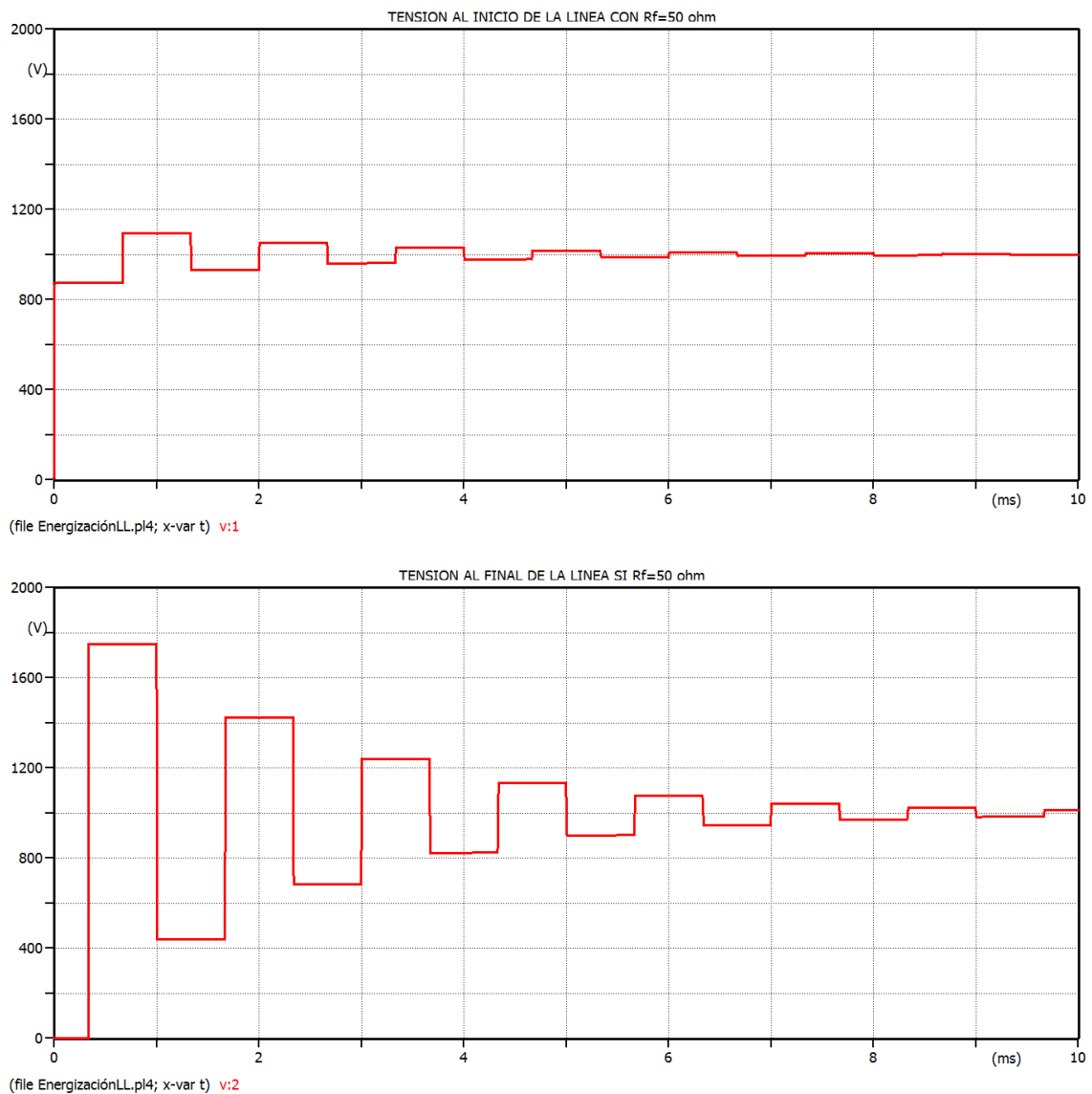
Como era de esperar al principio de la línea es constante ya que viene impuesta por la fuente.

Como en el final de la línea el coeficiente de reflexión es 1 (ecuación (6.4)), al llegar la onda de tensión al extremo final de la línea sufre una reflexión total y se obtiene una onda de valor el doble de la tensión incidente

$$u_{FinalLínea}(t = 0,33ms) = u_1 + \Gamma_f u_1 = 2 \cdot u_1 = 2000V \quad (6.6)$$

En este caso, al ser  $R_f = 0 \Omega$  según (6.5) el coeficiente de reflexión en la fuente vale -1, lo cual significa que de la fuente parte una onda de tensión de valor igual a la tensión incidente pero de signo opuesto.

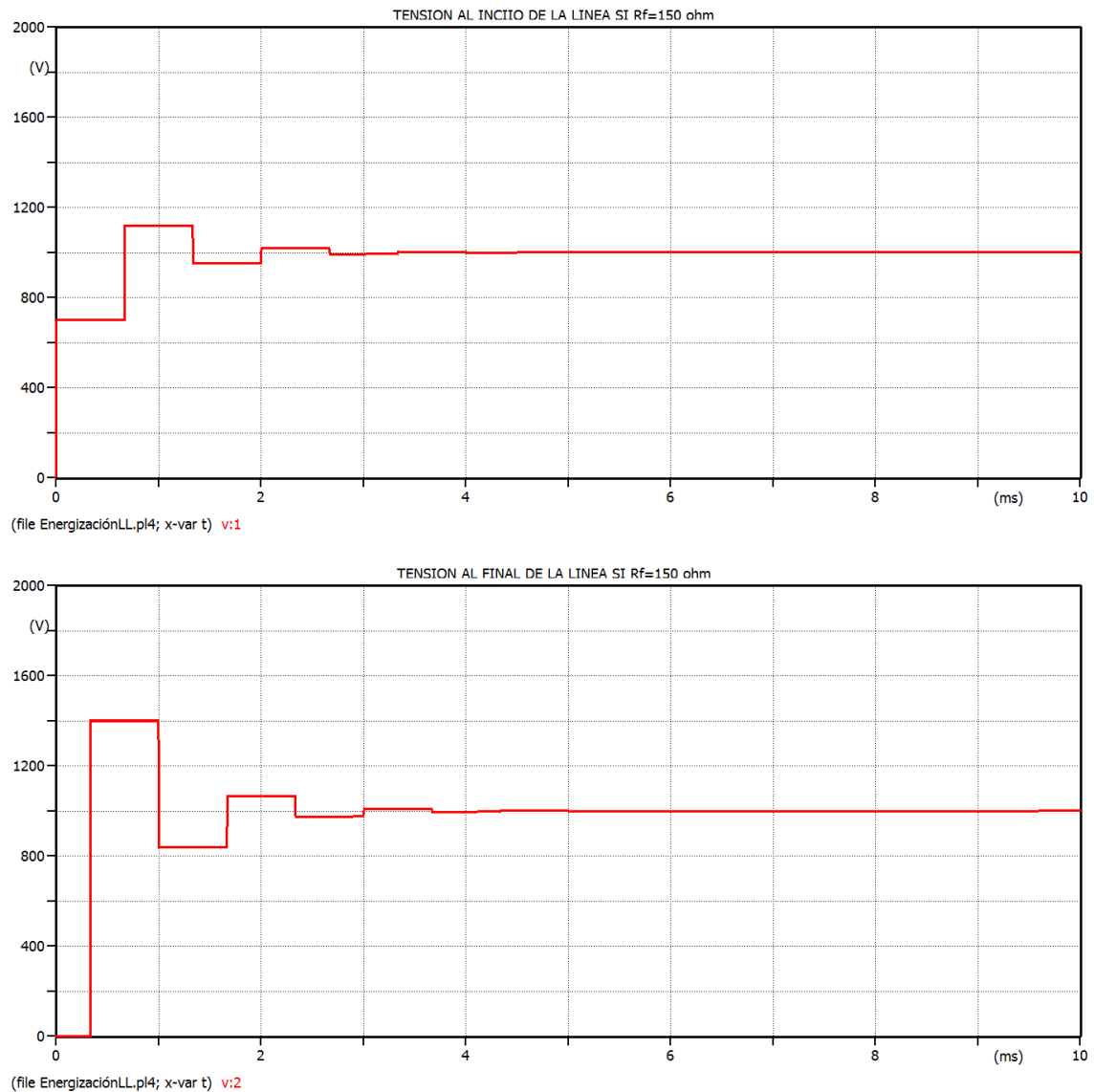
Hacemos una comparativa aumentando el valor de la resistencia de la fuente. En la figura 6.5. se muestra el caso de energización de una línea de resistencia despreciable a partir de una fuente de resistencia con valor  $50 \Omega$



**Figura 6.5:** Energización de una línea larga a partir de una fuente de corriente continua cuando  $R_f = 50 \Omega$ .

Figura superior: tensión al inicio de la línea, figura inferior tensión al final.

En la figura 6.6. se muestra el caso de energización de una línea de resistencia despreciable a partir de una fuente de resistencia con valor  $150 \Omega$ .



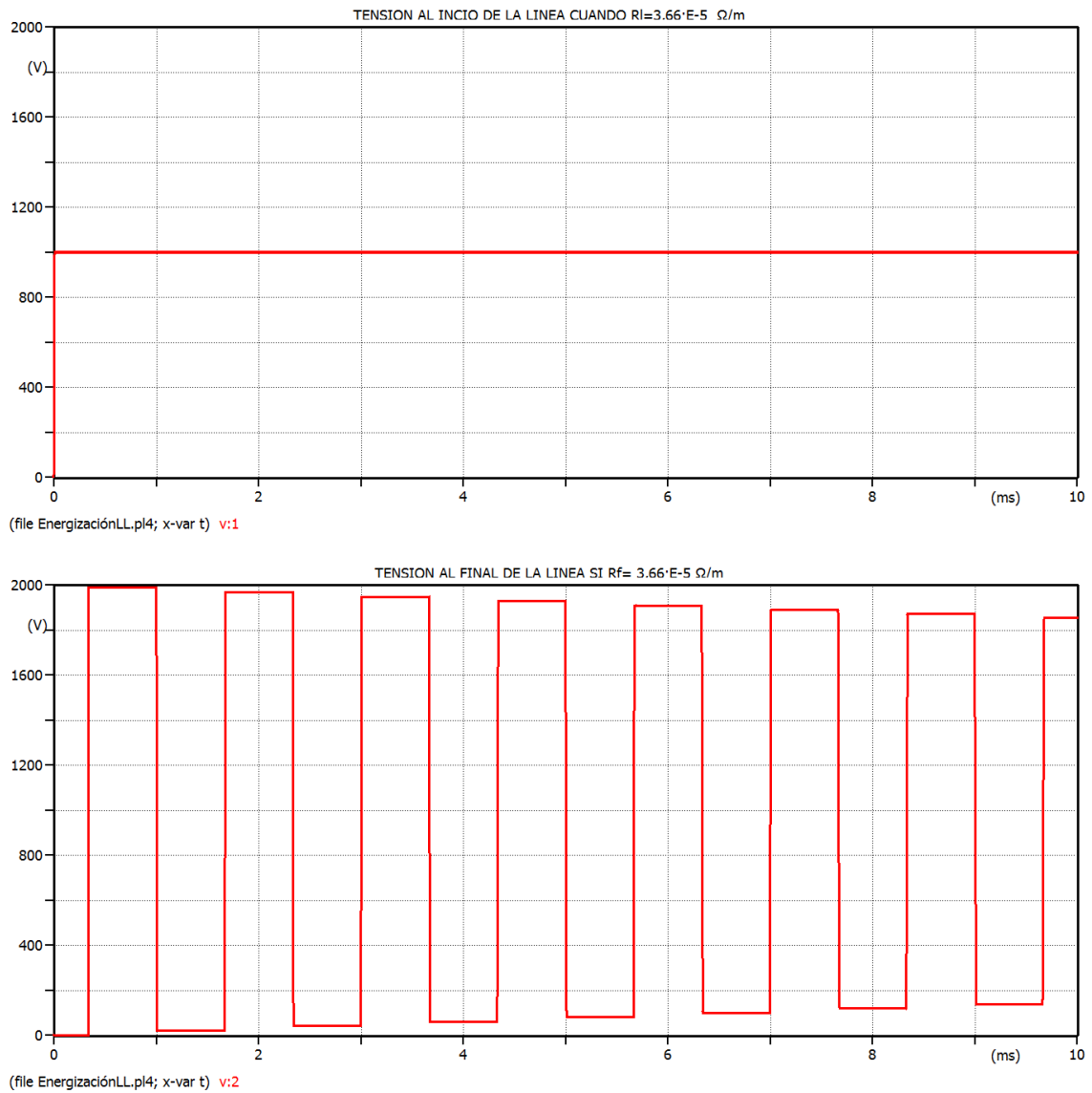
**Figura 6.6:** Energización de una línea larga a partir de una fuente de corriente continua cuando  $R_f = 150 \Omega$ .

Figura superior: tensión al inicio de la línea, figura inferior tensión al final

Comprobamos que el aumentar la impedancia interna de la fuente hace que el pico de sobretensión que se alcanza sea menor y que se produzca más rápidamente la amortiguación de la onda. Esto quiere decir que el valor de la sobretensión en el extremo de línea se puede reducir mediante la variación de la resistencia interna, lo cual se puede conseguir mediante un interruptor con resistencia de preinsercción.

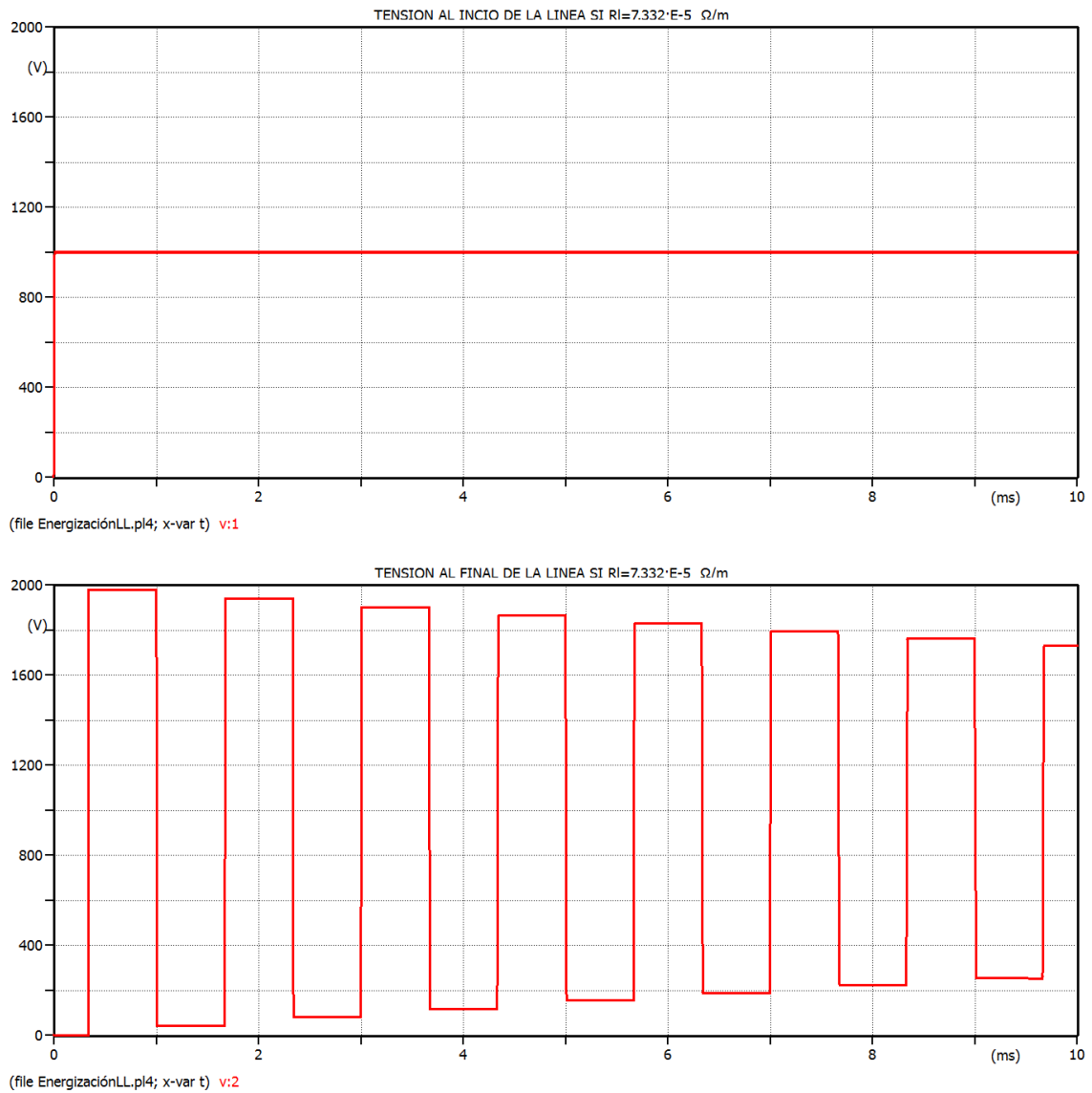
También se ha analizado el efecto de la resistencia de la línea. A continuación se muestran los resultados obtenidos al realizar la simulación para una resistencia interna de la fuente constante de valor de  $1E-6 \Omega$  y variando la resistencia de la línea de acuerdo a los valores de la tabla 5.1, extraída de (Stevenson, 1965)

En las figuras 6.7, 6.8 y 6.9 se muestran los resultados del caso de energización de una línea aumentando el valor de la resistencia por unidad de longitud de la misma:



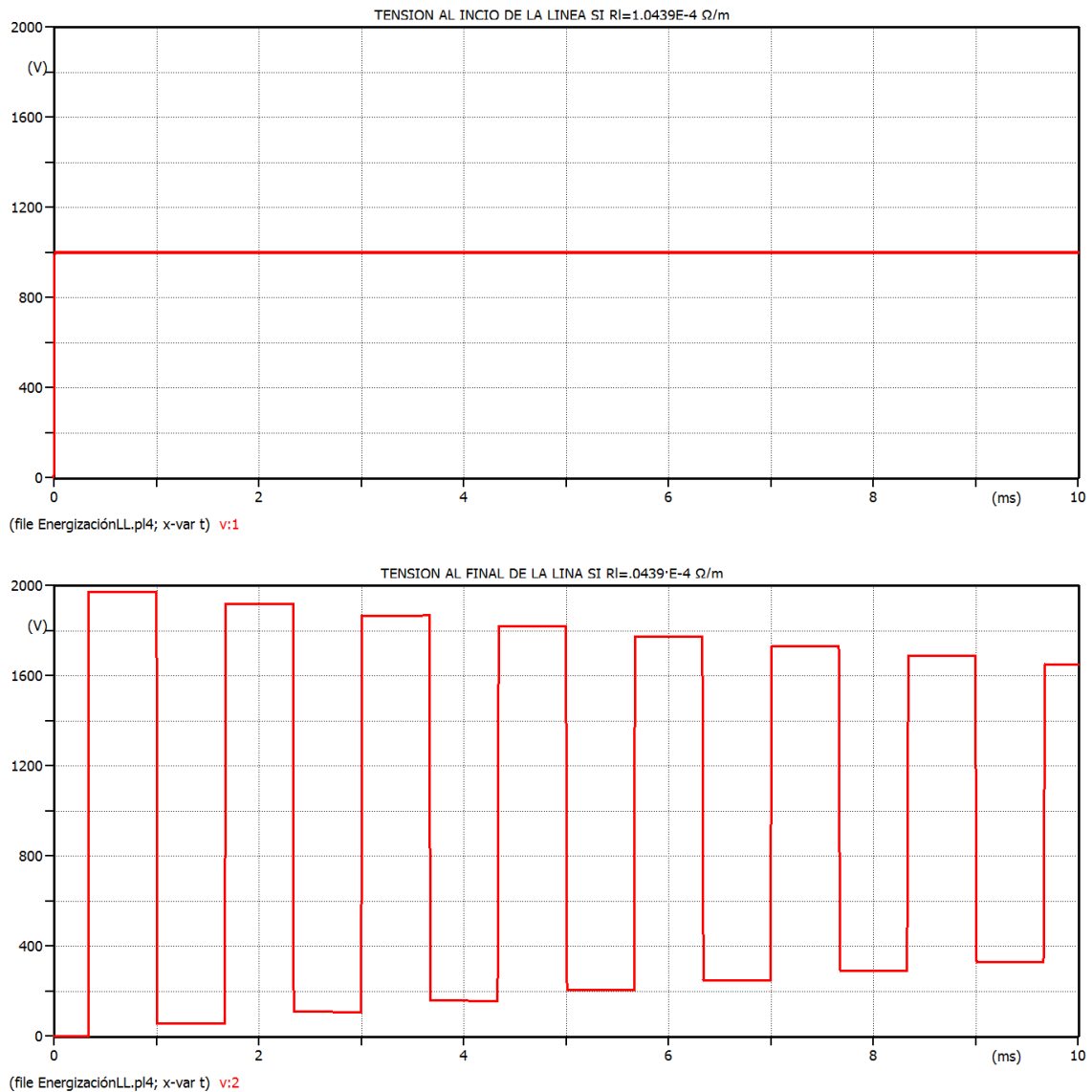
**Figura 6.7:** Energización de una línea larga a partir de una fuente de corriente continua, con una resistencia por unidad de longitud de  $3,66 \cdot 10^{-5} \frac{\Omega}{m}$

Figura superior: tensión al inicio de la línea, figura inferior tensión al final



**Figura 6.8:** Energización de una línea larga a partir de una fuente de corriente continua, con una resistencia por unidad de longitud  $7.332 \cdot 10^{-5} \frac{\Omega}{m}$

Figura superior: tensión al inicio de la línea, figura inferior tensión al final



**Figura 6.9:** Energización de una línea larga a partir de una fuente de corriente continua, con una resistencia por unidad de longitud de  $1.0439 \cdot 10^{-4} \frac{\Omega}{m}$

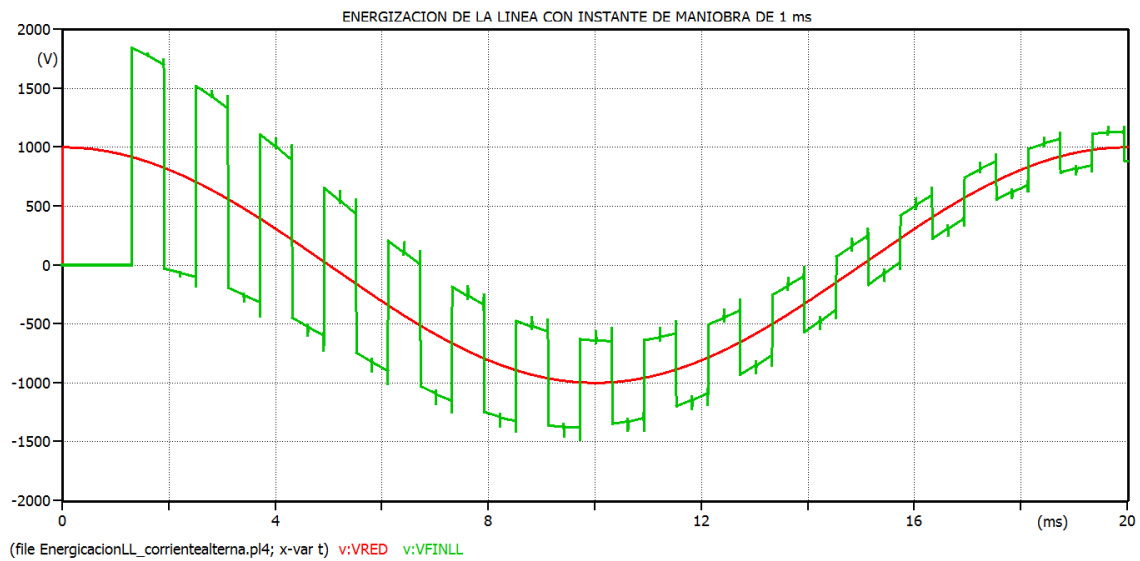
Figura superior: tensión al inicio de la línea, figura inferior tensión al final

Comprobamos que la resistencia característica de la línea no afecta en el extremo emisor, pues tras el aumento de ésta la tensión sigue siendo la misma y constante a 1000V. Esto es así, pues hemos dado un valor de la resistencia interna de la fuente muy pequeño y por tanto la caída de tensión en ella es despreciable. Podemos observar que conforme se aumenta la resistencia característica de la línea, al final de ésta se alcanzan picos inferiores de tensión, aunque la reducción del valor de pico no es tan importante como en el caso anterior. La amortiguación de la onda también es bastante más lenta que cuando se aumenta la impedancia interna de la fuente.

### **6.1.3. Caso de fuente de alimentación en corriente alterna**

Dado que en realidad, la energización de una línea larga se realiza con una fuente de corriente alterna, la cuantía de la sobretensión depende del instante en el que se cierra el interruptor. A continuación se muestran la evolución de la tensión en el extremo receptor de la línea para tres instantes de conexión distintos, manteniendo los valores característicos de la fuente y de la línea.

En la figura 6.10 el instante de maniobra es de 1ms después del paso por máximo de la onda de tensión de red:

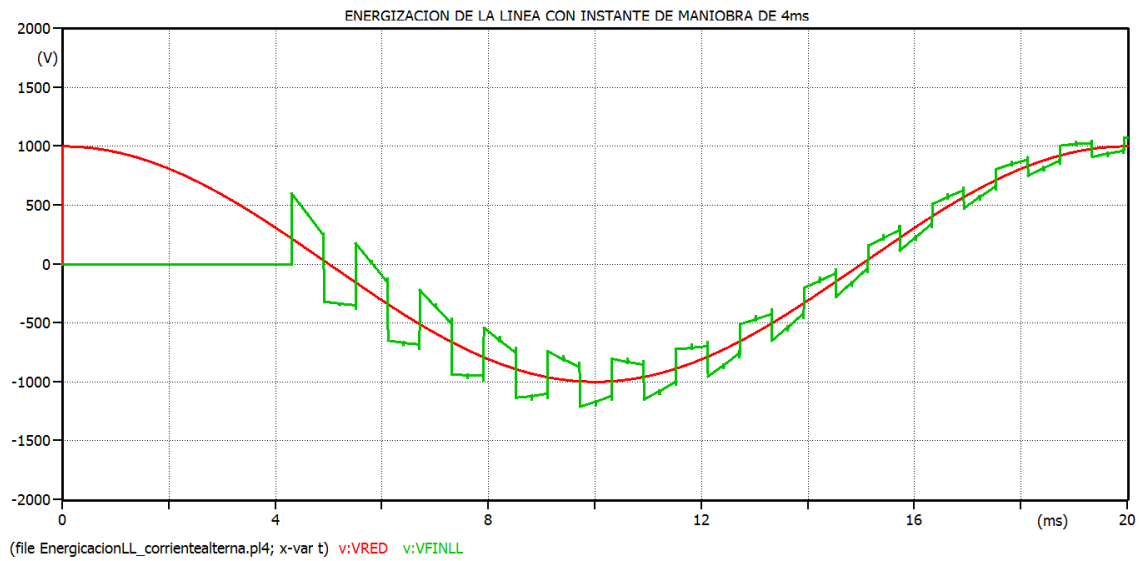


**Figura 6.10:** Energización de una línea larga a partir de una fuente de corriente alterna con instante de maniobra=1ms.

Onda de color rojo: tensión de la fuente. Onda de color verde: tensión en bornas del transformador.



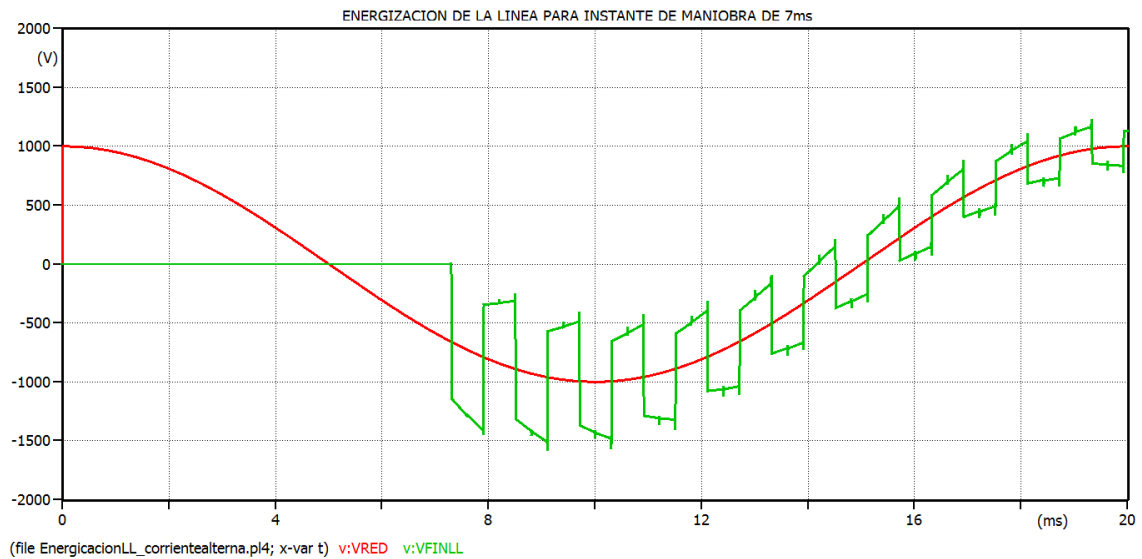
En la figura 6.11 el instante de maniobra es de 4ms después del paso por máximo:



**Figura 6.11:** Energización de una línea larga a partir de una fuente de corriente alterna con instante de maniobra=4ms

Onda de color rojo: tensión de la fuente. Onda de color verde: tensión en bornas del transformador.

En la figura 6.12 el instante de maniobra es de 7ms:



**Figura 6.12:** Energización de una línea larga a partir de una fuente de corriente alterna con instante de maniobra=7ms

Onda de color rojo: tensión de la fuente. Onda de color verde: tensión en bornas del transformador.

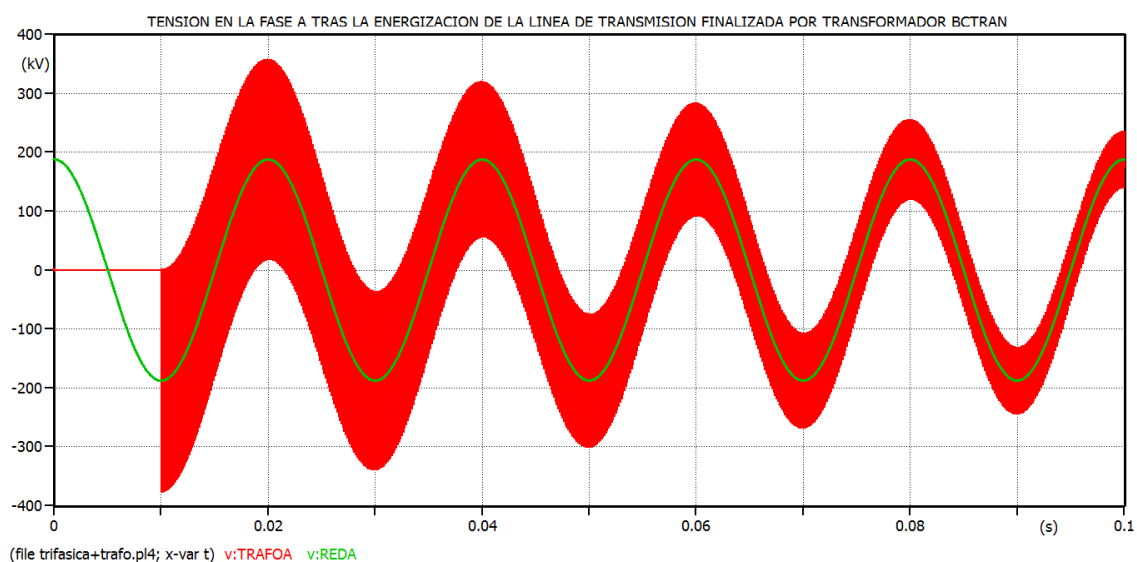
Se puede comprobar que se alcanza la sobretensión máxima cuando el instante de conexión de la línea coincide con el instante en el que la sinusoide de la tensión pasa por su cresta. Comprobamos también que la propagación de la onda se realiza con atenuación. Esto es debido a que la línea tiene una resistencia, y por tanto unas pérdidas; de forma que el extremo receptor alcanza el valor de la tensión en origen en un tiempo más corto.

Los resultados obtenidos en este apartado son idénticos a los obtenidos por (Velasco, 2007) con los mismos parámetros de simulación.

## **6.2. RESULTADOS TRAS LA ENERGIZACIÓN DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN FINALIZADA POR TRANSFORMADOR TRIFÁSICO**

En este apartado se utilizarán los valores característicos de la fuente y la línea trifásica del apartado anterior y se añadirá un transformador al sistema. Además se variará el valor de las pérdidas en el transformador para comprobar su efecto en el valor de las sobretensiones. En la primera simulación las pérdidas del transformador serán las indicadas en las tablas 5.4 y 5.5. En la segunda simulación se disminuirán las pérdidas del transformador, manteniendo constantes los demás valores.

Tomando unas pérdidas en el ensayo de cortocircuito de un valor de 429,91 kW y unas pérdidas en vacío de 54,55 kW, la tensión obtenida en bornas del transformador es la mostrada en la figura 6.13:



**Figura 6.13:** Energización de la línea trifásica con transformador al final de la línea.

Onda de color verde: tensión de la fuente. Onda de color rojo: tensión en bornas del transformador.

Para un tiempo de 0.02s los resultados de las sobretensiones que se presentan en la figura 6.13 son los siguientes:

Valor de cresta de la tensión en la fuente	187,7 kV
Sobretensiones en el transformador	352,9 kV

**Tabla 6.1:** Resultado de la máxima sobretensión obtenida para el instante de simulación 0,02s con modelo de transformador BCTRAN sin proteger

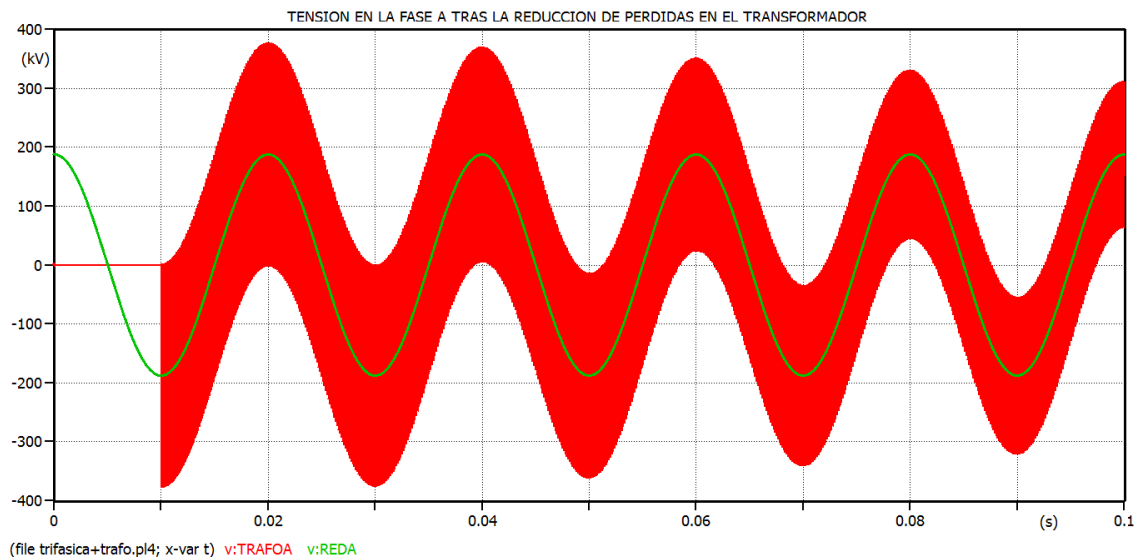
En la tabla 6.2 se muestra el efecto que provocan las pérdidas del transformador, haciendo que la onda de sobretensión del transformador se amortigüe alcanzando valores próximos a los valores de tensión de red. Comprobamos dicho efecto para un tiempo de simulación de 0,08 s:

Valor de cresta de la tensión en la fuente	187,7 kV
Sobretensiones en el transformador	251,7 kV

**Tabla 6.2:** Efecto de la amortiguación de la onda de sobretensión debido a las pérdidas en el transformador

Se observa que a efectos de las reflexiones de onda un transformador se comporta prácticamente como un circuito abierto, ya que la tensión en bornas del transformador es casi el doble de la tensión de la fuente, de modo que es coeficiente de reflexión que se ofrece a las ondas viajeras es cercano a 1.

Si reducimos las pérdidas a 0,01kW en ambos ensayos, las tensiones al final de la línea son las mostradas en la figura 6.14:



**Figura 6.14:** Energización de la línea trifásica con transformador de bajas pérdidas al final de la línea. Onda de color verde: tensión de la fuente. Onda de color rojo: tensión en bornas del transformador.

Si de igual forma tomamos los valores de las sobretensiones en la red y en el transformador para el instante 0,02s de la simulación, los resultados obtenidos son los mostrados en la tabla 6.3:

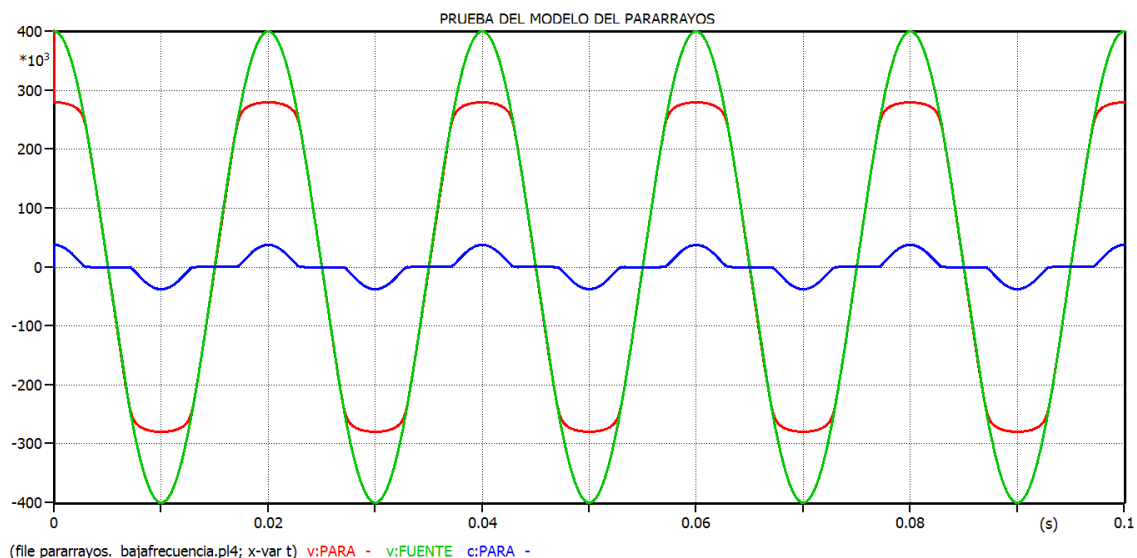
Valor de cresta de la tensión en la fuente	187,7 kV
Sobretensiones en el transformador	375 kV

**Tabla 6.3:** Resultado de la máxima sobretensión obtenida para el instante de simulación 0,02s, tras la reducción de pérdidas en los ensayos del transformador BCTRAN

Como vemos al reducir las pérdidas del transformador la amortiguación de la tensión al final de la línea es menor, si bien el valor de cresta de la primera oscilación es semejante en uno y otro caso. En la figura 6.13, las sobretensiones se van amortiguando de forma rápida, acercándose al valor de la tensión de la fuente.

### **6.3 RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL MODELO DE PARARRAYOS DISEÑADO**

Para comprobar el correcto funcionamiento del pararrayos, el voltaje de la fuente debe ser como mínimo el voltaje residual del pararrayos, para que así este actúe. Los resultados para un error de ajuste ErrLim del 5% se representan en la siguiente figura:



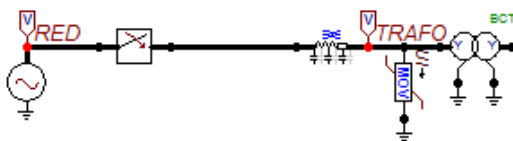
**Figura 6.15:** Tensión de la prueba a baja frecuencia del pararrayos modelo 92.

Onda de color verde: tensión de la fuente. Onda de color rojo: tensión en bornas del pararrayos. Onda de color azul corriente consumida por el pararrayos.

Se comprueba que mientras la tensión de la fuente (onda de color verde) es reducida la corriente drenada por el pararrayos (onda de color azul) es casi nula y la tensión en el pararrayos (onda de color rojo) prácticamente coincide con la de la fuente (son indistinguibles). Cuando la tensión de la fuente es elevada (valor próximos al máximo de la senoide de color verde) el pararrayos comienza a actuar drenando corriente (curva azul) y haciendo que la tensión en bornas de la autoválvula (curva roja) permanezca en un valor casi constante. Este comportamiento corresponde al que cabe esperar de un pararrayos, de lo que deducimos que el modelo se comporta de forma satisfactoria.

## **6.4 RESULTADOS DEL EFECTO DEL PARARRAYOS ANTE SOBRETENSIONES DE TIPO MANIOBRA**

En este apartado se añadirá un pararrayos al circuito utilizado en el apartado 6.2. A diferencia de lo que se hará en próximos apartados, en este caso el pararrayos se situó en las propias bornas del transformador. La figura 6.16 muestra el circuito utilizado para esta simulación, ya presentado en el apartado 5.5.

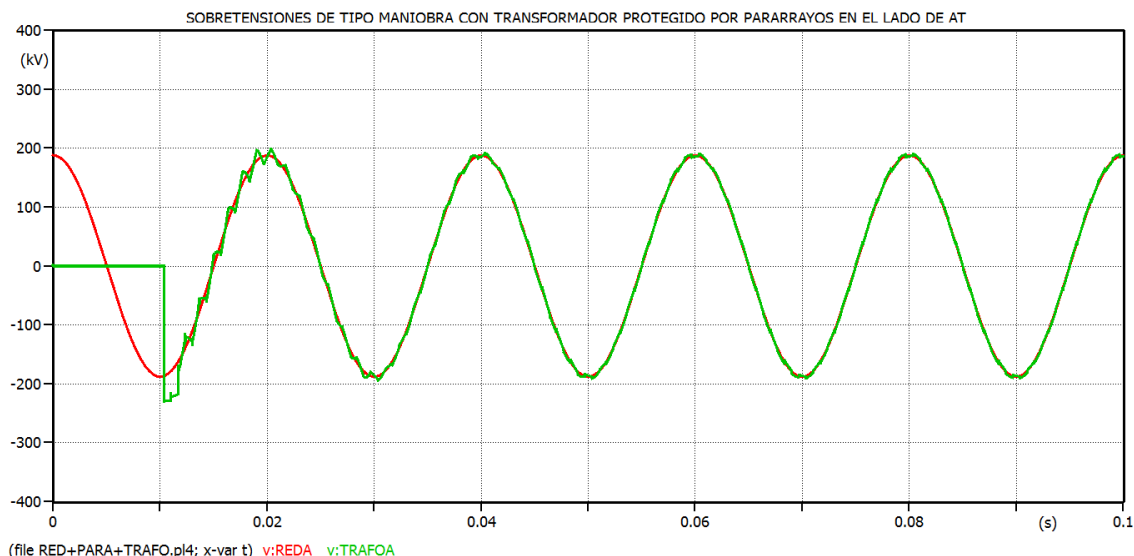


**Figura 6.16:** Circuito del estudio ante sobretensiones de tipo maniobra

Una vez protegida el transformador con el modelo de pararrayos diseñado, obtenemos los resultados mostrados en la figura 6.17 ante sobretensiones de tipo maniobra al producirse el cierre del interruptor y por la tanto la energización del transformador.

Para este estudio se considera un paso de integración de 1  $\mu$ s y un tiempo de simulación de 0,1s.

En la figura 6.17 se visualizan los resultados obtenidos al realizar esta simulación:



**Figura 6.17:** Energización de la línea trifásica con transformador al final de la línea protegido por pararrayos.

Onda de color verde: tensión de la fuente. Onda de color verde: tensión de la fuente. Onda de color rojo: tensión en bornas del transformador.

Se realiza una comparación de la tensión máxima que alcanza el transformador una vez protegido por el pararrayos dimensionado. Para ello se toma en un tiempo de 10,38 ms

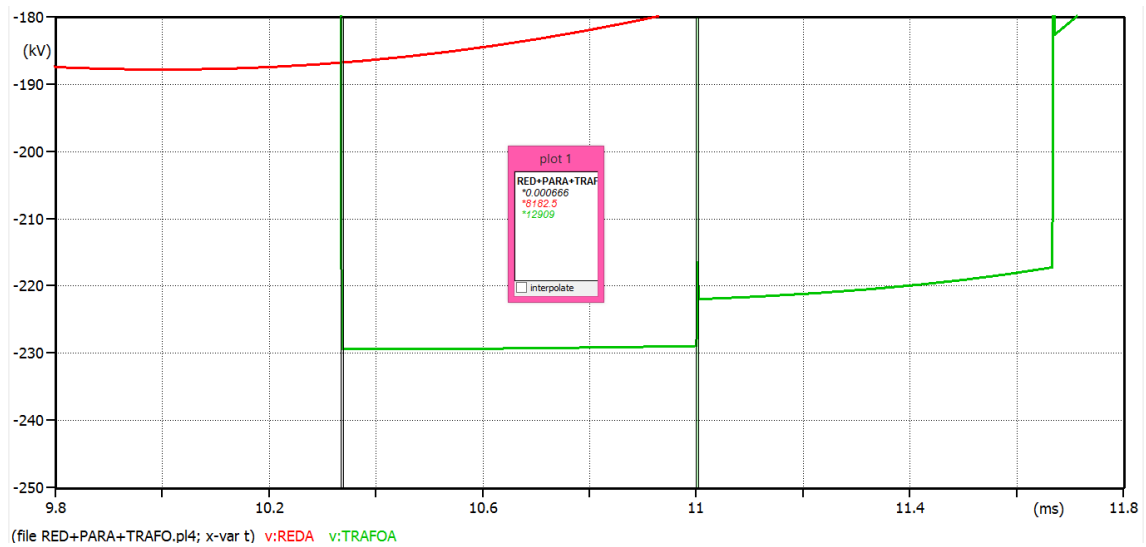
En la tabla 6.4 se muestra el valor máximo de sobretensión obtenido en la simulación 6.17:

<b>Valor de cresta de la tensión en la fuente</b>	186,7 kV
<b>Sobretensiones en el transformador</b>	<b>229,39 kV</b>

**Tabla 6.4:** Resultado de la máxima sobretensión obtenida para el instante de simulación 10,38 ms, tras la protección del transformador con pararrayos situado en bornas del mismo

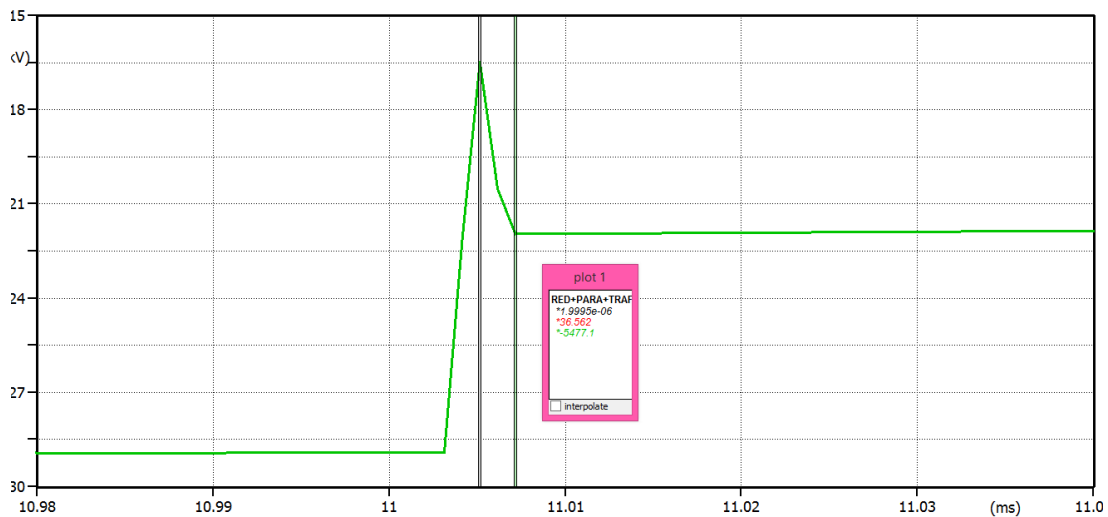
Comparando la figura 6.17 con la figura 6.13 se observa la correcta actuación del pararrayos ante sobretensiones de tipo maniobra, pues se distingue de forma notable como disminuye la tensión en el transformador al colocar el pararrayos. La máxima sobretensión que alcanza al transformador cuando se protege con pararrayos es de 229,39 kV en lugar de ser 352,9 kV.

Si se mide el tiempo entre pulsos de la onda para el momento en el que se alcanza la mayor sobretensión este es de 0,666ms. Este tiempo entre pulsos se mide con el cursor de ATPDraw y es el tiempo que tarda la onda generada en el pararrayos en llegar a la fuente de tensión a la velocidad de la luz más el tiempo que tarda la onda rebotada en la fuente de tensión en llegar de nuevo al transformador. A medida que pasa el tiempo la onda de sobretensión en el transformador se va amortiguando hasta asemejarse a la onda de tensión de red. En la figura 6.18 se muestra la medida del tiempo ente impulsos de tensión realizada en ATP.



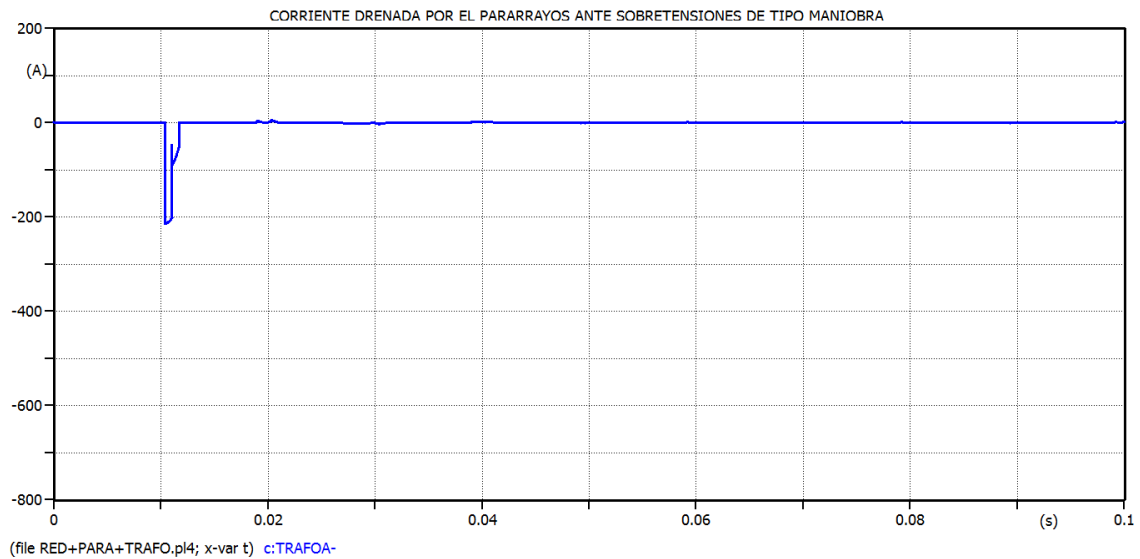
**Figura 6.18:** Zoom de la figura 6.17 para la visualización del tiempo que tarda la onda en ir y volver del pararrayos a la fuente de tensión

Si por otro lado se hace zoom a los picos de tensión que se producen entre los intervalos de estos pulsos, se puede conocer el tiempo que tarda la onda generada en el pararrayos en llegar al transformador a la velocidad de la luz más el tiempo que tarda la onda rebotada en el transformador en llegar de nuevo al pararrayos. Dado que el pararrayos está situado en bornas del transformador, las ondas rebotan en un tiempo muy reducido, alcanzando un valor de aproximadamente  $2\mu\text{s}$  como puede comprobarse en la figura 6.19:



**Figura 6.19:** Zoom de la figura 6.17 para la visualización del tiempo que tarda la onda en ir y volver del pararrayos al transformador

En la figura 6.20 se estudia la corriente que drena el pararrayos para esta simulación, cuando se encuentra en bornas del transformador y es sometido a una sobretensión tipo maniobra:



**Figura 6.20:** Corriente drenada por el pararrayos ante sobretensión de tipo maniobra

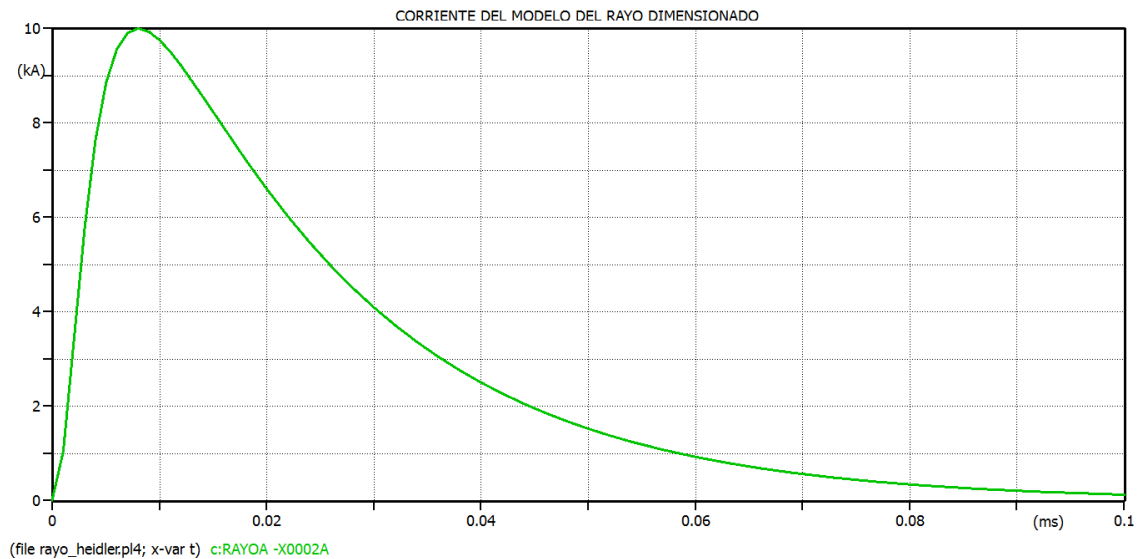
El pico de corriente que se visualiza en la figura 6.20 alcanza un valor de **213,8 A** en el instante de tiempo de 10,34 ms. La corriente que drena el pararrayos ante sobretensiones de frente lento es reducida si se compara con la que drena ante sobretensiones de frente rápido o atmosféricas, lo cual se analiza en próximos apartados.



## **6.5 RESULTADOS DEL DIMENSIONADO DEL RAYO**

Como se describe en el apartado 5.6 se realiza la simulación del rayo con una fuente de tipo impulso.

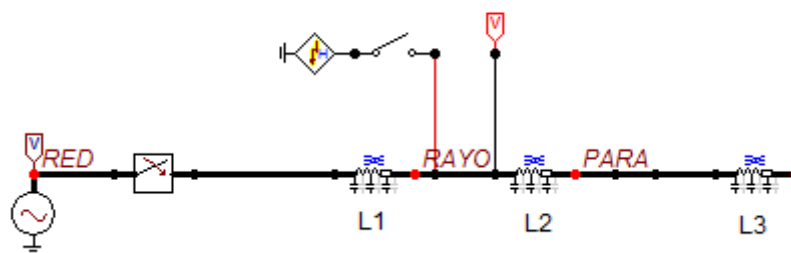
En la figura 6.21 se muestra la corriente del rayo dimensionado para el objetivo final:



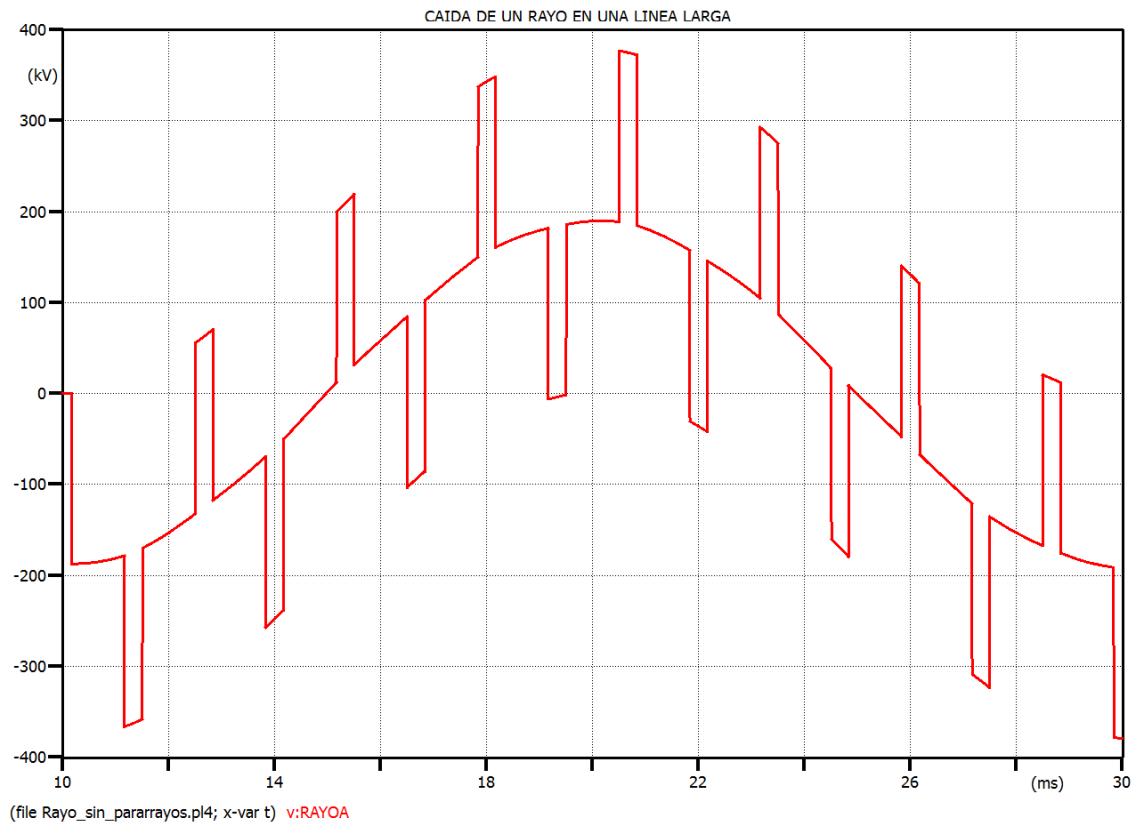
**Figura 6.21:** Dimensionado del rayo 10 kA, 8/20  $\mu$ s.

En esta figura de la corriente del modelo del rayo dimensionado se comprueba que el rayo sube de 0 a 10kV en un tiempo de 8  $\mu$ s.

Si se aplica esta onda tipo rayo a una línea larga como la mostrada en la figura 6.22, sin pararrayos ni transformador, la sobretensión que se tiene en la línea se muestra en la figura 6.23.



**Figura 6.22:** Aplicación de una onda tipo rayo a una línea larga



**Figura 6.23:** Sobretensiones producidas por la caída de un rayo en una línea larga

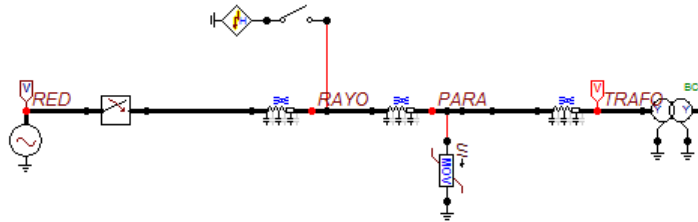
En la figura 6.23 se observa más de un pulso de sobretensión, lo cual es debido a las reflexiones de la onda viajera de sobretensión en el extremo abierto de la línea y en el extremo conectado a la fuente.

## **6.6 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA SELECCIÓN DEL MODELO MÁS ADECUADO DE TRANSFORMADOR ANTE SOBRETENSIONES DE ORIGEN ATMOSFÉRICO**

ATP proporciona varios modelos de transformador. El modelo BCTRAN es un modelo sencillo que requiere pocos datos. El modelo HYBRID es un modelo algo más complejo que requiere conocer más datos del transformador. Para comprobar si está justificado un aumento de la complejidad, en este apartado se compara la respuesta de ambos modelos y se toma la decisión sobre qué modelo adoptar para futuras simulaciones. Para justificar la elección tomada se analiza la importancia de las capacidades parásitas en la cuantía de las tensiones obtenidas.

### **6.6.1. Respuesta del sistema utilizando el modelo BCTRAN**

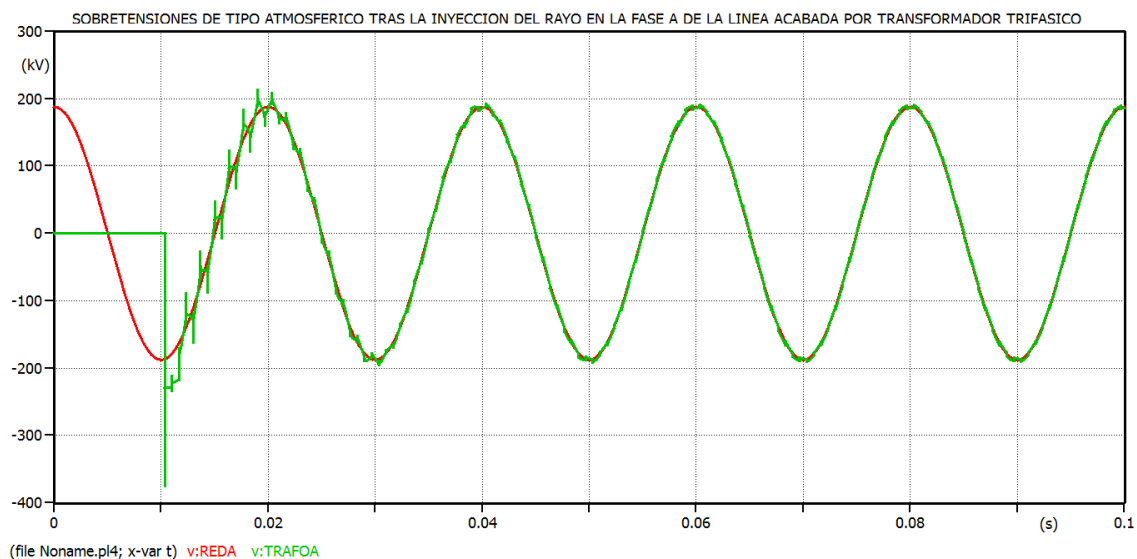
Para el análisis de las sobretensiones atmosféricas de este apartado recordamos el circuito eléctrico diseñado en el apartado 5.7.2:



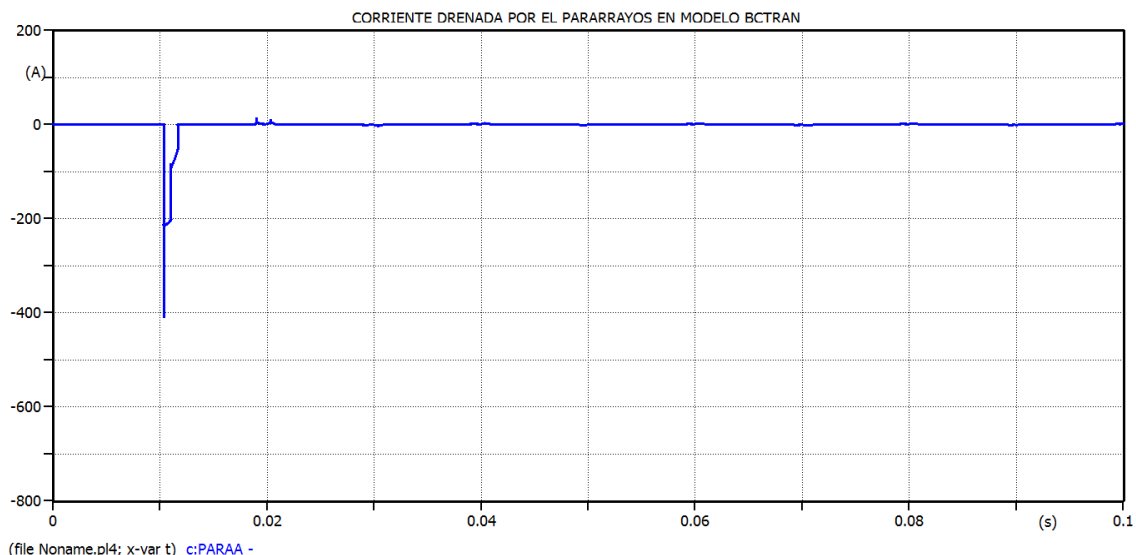
**Figura 6.24:** Circuito completo para el estudio de sobretensiones atmosféricas en una línea trifásica finalizada por transformador TRIFÁSICO

Se realizará la simulación para poder visualizar las sobretensiones que provoca la caída del rayo cuando el pararrayos se encuentra protegiendo el lado de alta tensión del transformador BCTRAN una distancia de 25m. La longitud de la línea, desde la fuente al transformador es de 100 km, y el rayo impacta a la mitad de la distancia entre el transformador y la fuente. El interruptor que aplica el rayo a la línea se mantiene cerrado tan sólo 40  $\mu$ s, y al cabo de estos 40  $\mu$ s abre.

En las figuras 6.25 y 6.26 se muestran la tensión en bornas del transformador y la corriente consumida por el pararrayos obtenidas en dicha simulación. No se ha representado la tensión en bornas del pararrayos porque es prácticamente indistinguible.



**Figura 6.25:** Sobretensiones atmosféricas del estudio del circuito completo con transformador trifásico. Onda verde: tensión en el transformador. Onda roja: tensión de la fuente



**Figura 6.26:** Corriente drenada por el pararrayos del estudio del circuito completo para el caso de línea finalizada en transformador trifásico

En la tabla 6.5 se resumen el mayor valor de sobretensión que alcanza esta simulación:

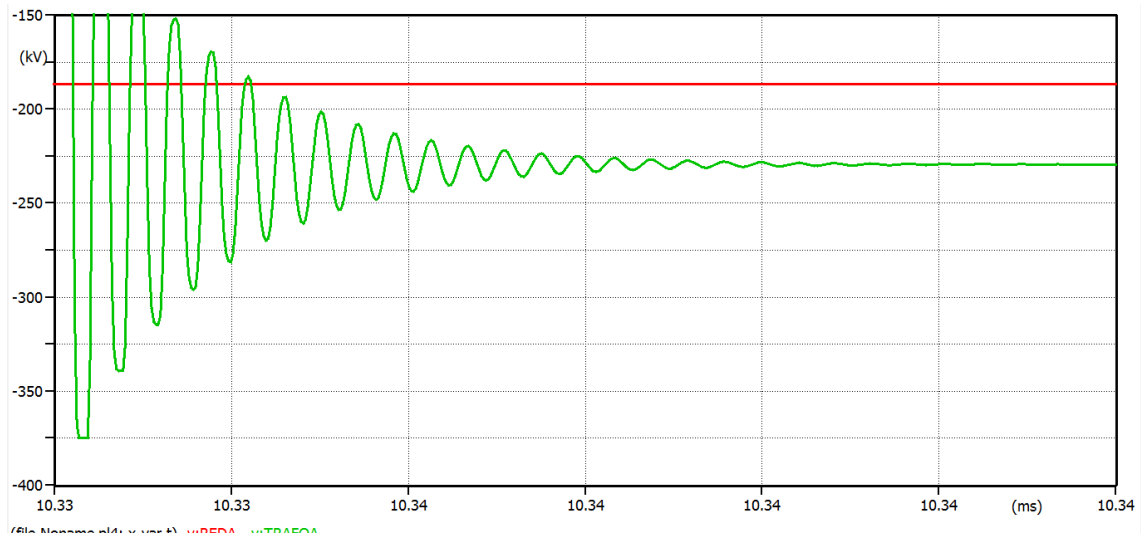
Para d= 25m, en el instante 10 ms	
Valor de cresta de la tensión en la fuente	186,7 kV
Máxima Sobretensión en el transformador	374,7 kV

**Tabla 6.5:** Resultado de las mayor sobretensión obtenida en la línea finalizada por transformador trifásico protegido por pararrayos situado a 25 metros del mismo utilizando el modelo BCTAN

El valor máximo de la corriente drenada por el pararrayos utilizando el modelo BCTAN es de 409,6 A, lo cual se visualizada en el pico de corriente de la figura 6.26.

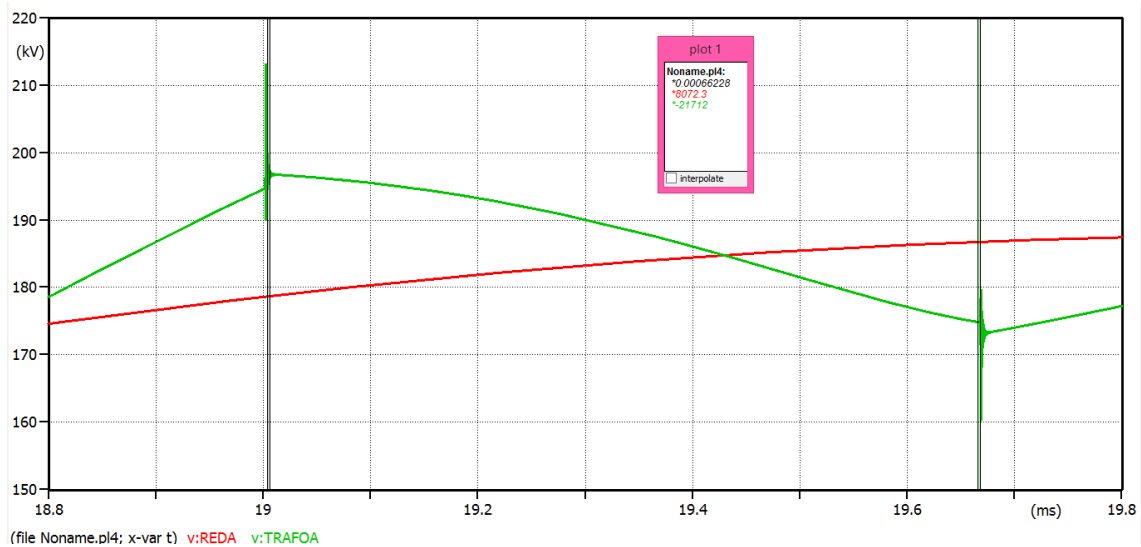
En las figuras 6.25 y 6.26 se observa lo siguiente:

- Un primer pico de sobretensión que es reducido por la actuación del pararrayos. Ténganse en cuenta que la transición del pararrayos entre el estado de alta impedancia y el un estado de baja impedancia se ha tomado como paso de integración, y que al estar el pararrayos a 25 m del transformador las ondas que se generan en el pararrayos para reducir las sobretensiones del rayo tardan sólo  $8,33 \cdot 10^{-8}$  segundos en recorrer la distancia entre el pararrayos y el transformador. Este tiempo es indistinguible en la figura 6.23. Este pico de tensión tiene un valor de 374,7 kV (como se aprecia en la tabla 6.5). Haciendo un zoom en el pico de sobretensión se aprecia que este pico en realidad es una onda amortiguada, amortiguación que se produce en el tiempo de viaje de las ondas generadas en el pararrayos hasta el transformador más el tiempo de viaje de las ondas rebotadas en el transformador hasta el pararrayos. Esto se muestra en la figura 6.27:



**Figura 6.27:** Zoom al primer pico de sobretensión de la figura 6.25 para visualizar la amortiguación de la onda en el tiempo de viaje de las ondas pararrayos-transformador

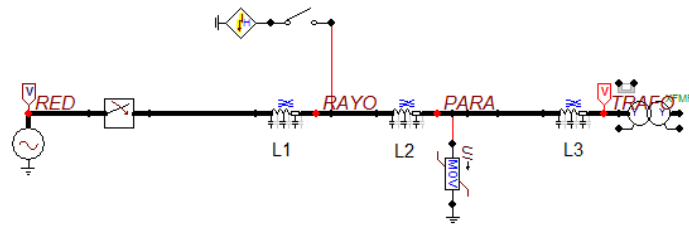
- Posteriores picos de tensión distantes entre sí distan un tiempo de  $6,62 \cdot 10^{-4}$  s (figura 6.28). Este tiempo es la suma del tiempo que tardan las ondas viajeras que se generan en el pararrayos en llegar a la fuente más el tiempo que tardan en llegar las ondas rebotadas en la fuente al transformador de nuevo. Cada vez que llega una nueva onda viajera al pararrayos se genera un tren de pulsos amortiguado semejante al mencionado anteriormente (figura 6.27), pero con una amplitud inferior, ya que la diferencia entre la tensión en el pararrayos entre el estado anterior a la llegada de la onda y el estado posterior es ahora menor. En la figura 6.28, a título de ejemplo se muestra el tiempo entre el primer pico de tensión y el segundo.



**Figura 6.28:** Zoom entre los dos primeros picos de sobretensión de la figura 6.25

### **6.6.2. Respuesta del sistema utilizando el modelo HYBRID.**

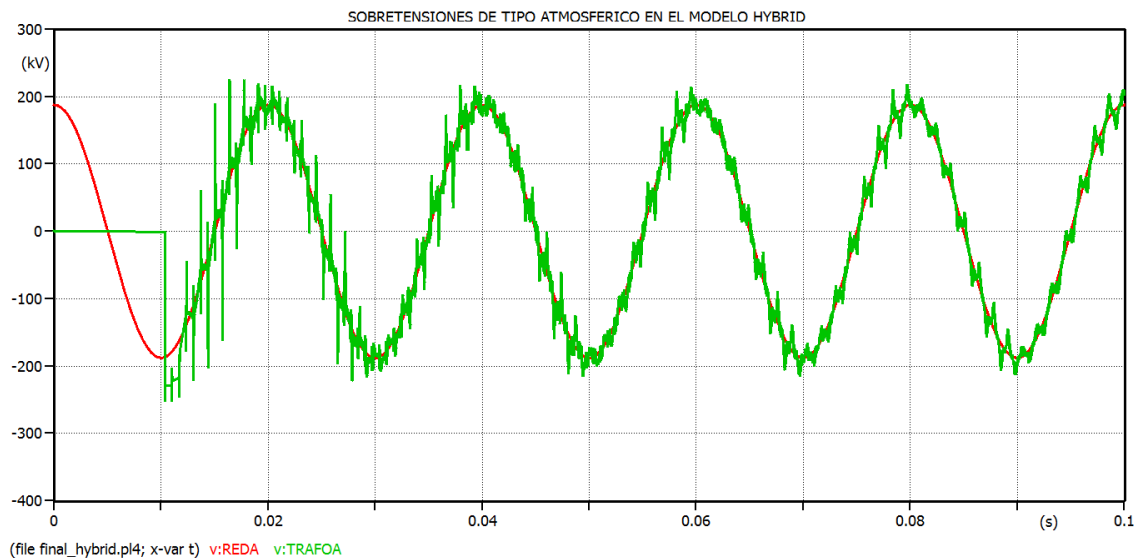
El circuito eléctrico utilizado es el diseñado en el apartado 5.7.3 y se muestra en la figura 6.29.



**Figura 6.29:** Circuito completo para el estudio de sobretensiones atmosféricas en una línea trifásica finalizada por el modelo HYBRID de transformador

Las simulaciones para el estudio de las sobretensiones se realizarán de forma análoga a las del apartado anterior con el transformador BCTRAN para en primer lugar tener una visión de la diferencia que provoca el cambio modelo de transformador y la consideración de las capacidades entre arrollamientos y entre estos y tierra.

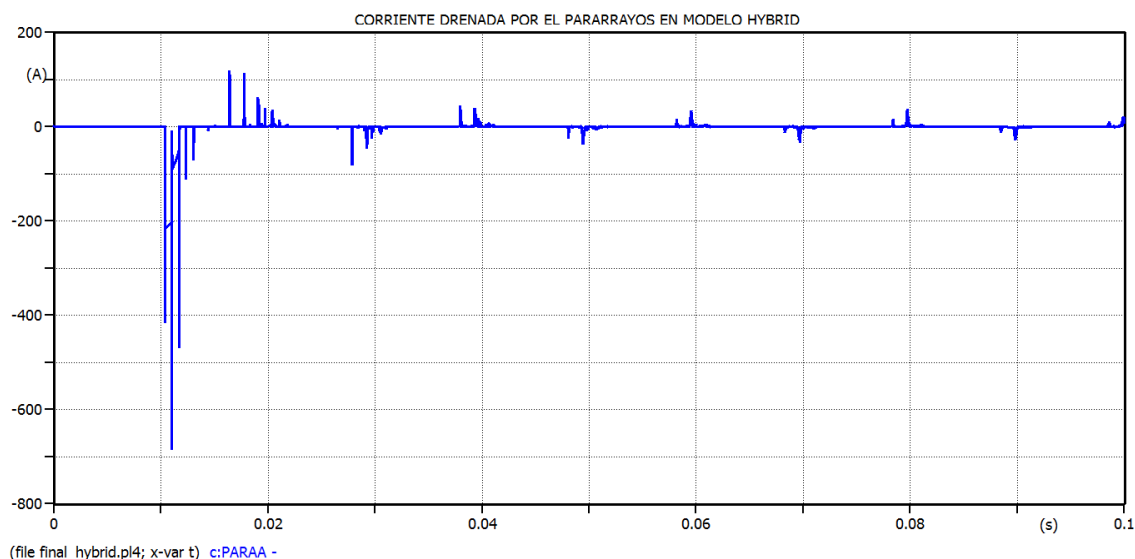
Los resultados obtenidos de las sobretensiones al inyectar un rayo a la fase A del transformador HYBRID con el lado de alta tensión protegido por el pararrayos diseñado colocado a una distancia de 25m se presentan en la figura 6.30:



**Figura 6.30:** Sobretensiones atmosféricas del estudio del circuito completo con transformador híbrido

Onda verde: tensión en el transformador. Onda roja: tensión de la fuente

En la figura 6.31 se muestra la corriente drenada por el pararrayos tras la inyección del rayo en la fase A de la línea



**Figura 6.31:** Corriente drenada por el pararrayos del estudio del circuito completo para el caso de línea finalizada en transformador híbrido

En la tabla 6.6 se resume mayor pico de sobretensión alcanzado en dicho estudio, que puede visualizarse haciendo zoom a la figura 6.30.

Para d= 25m, en el instante 10,336 ms	
Valor de cresta de la tensión en la fuente	186,7 kV
Máxima Sobretensión en el transformador	251,72 kV

**Tabla 6.6:** Resultado de la mayor sobretensión obtenida en la línea finalizada por transformador híbrido protegido por pararrayos situado a 25 metros del mismo

El valor máximo de la corriente drenada por el pararrayos utilizando el modelo HYBRID (figura 6.31) es de 690 A, bastante diferente al obtenido utilizando el modelo BCTAN.

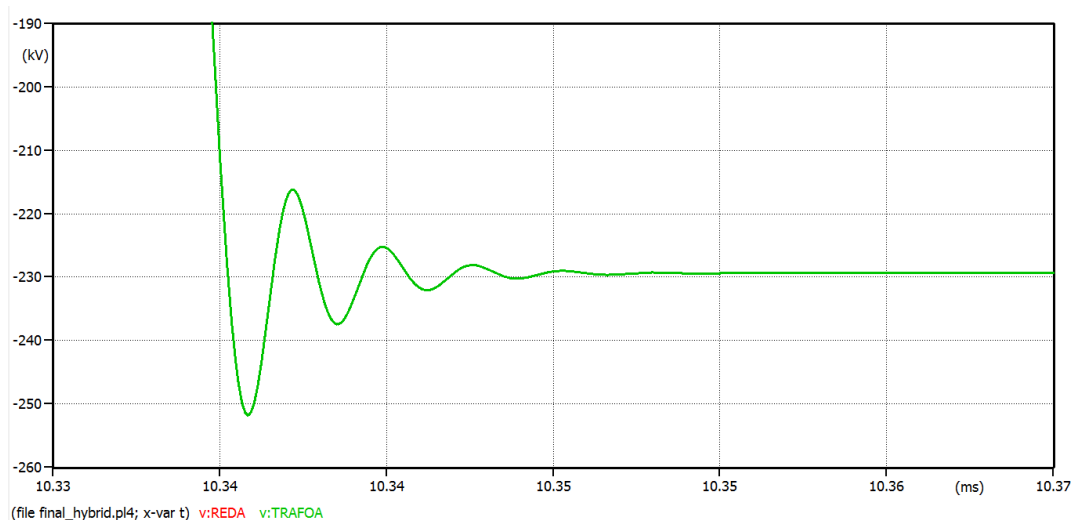
Como se puede apreciar observando las figuras 6.25 y 6.30 la influencia de las capacidades parásitas en las sobretensiones que recibe el transformador es muy importante.

- De una parte la cuantía de la máxima sobretensión que alcanza al transformador es mucho más reducida, como se puede apreciar comparando las tablas 6.5 y 6.6. Aunque las razones de esta reducción de las sobretensiones no son inmediatas, como hipótesis más plausible se plantea que las capacidades a tierra del primario del transformador constituyen un camino de baja impedancia para la corriente del rayo, ya que la derivada de la tensión en el tiempo es muy elevada, y en estas condiciones la corriente drenada por un condensador es elevada. Al reducirse la impedancia que presenta el transformador a la fuente se disminuye el coeficiente de reflexión y con

ello la cuantía de la onda de tensión reflejada es menor y la tensión en bornas del transformador (suma de la onda incidente y de la onda reflejada) disminuye.

- Aumenta la cuantía de los picos de sobretensión subsiguientes al primero, de tal forma que en algunos instantes de tiempo (por ejemplo en  $t=0,016$  s) se alcanzan picos de sobretensión tan importantes como el primero si bien de polaridad opuesta. Tanto es así que el pararrayos actúa en un mayor número de ocasiones, como se muestra en la figura 6.31.
- La onda de sobretensión tarda mucho más en amortiguarse.
- La tensión en el transformador disminuye (suma de la onda incidente y de la onda reflejada)

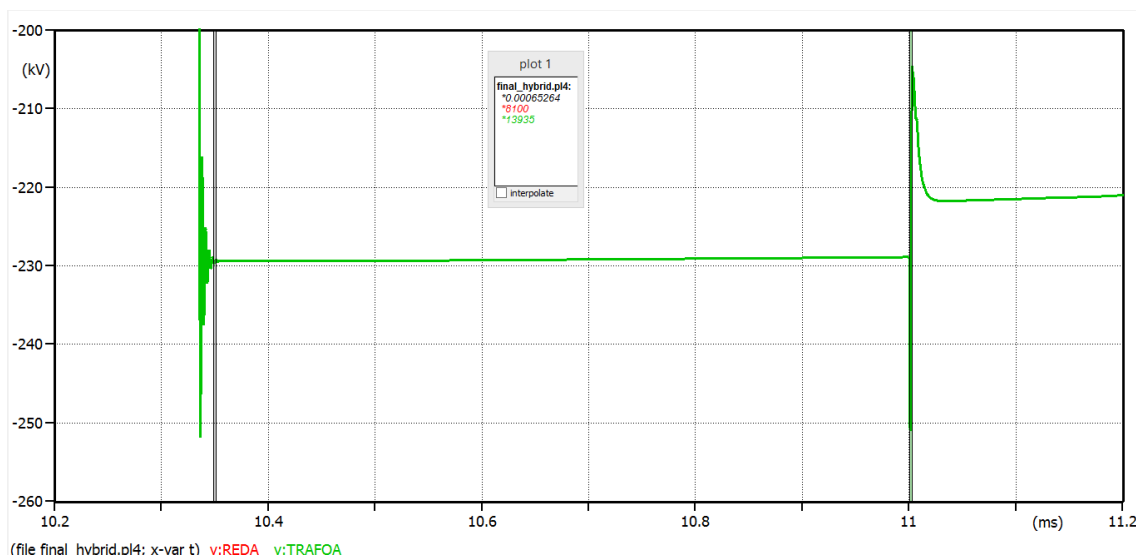
Haciendo un zoom en el pico de sobretensión se aprecia que este pico se amortigua más rápido que en el caso anterior con la línea finalizada por el modelo de transformador BCTAN. En la figura 6.32 se visualiza este fenómeno:



**Figura 6.32:** Zoom al primer pico de sobretensión de la figura 6.30 para visualizar la amortiguación de la onda durante el tiempo de viaje de las ondas pararrayos-transformador

En la figura 6.33 se puede apreciar como los picos de tensión distan entre sí un tiempo de  $6,52 \cdot 10^{-4}$  s, de igual forma que lo hacían los picos de tensión del modelo finalizado por el transformador BCTAN.





**Figura 6.33:** Zoom entre los dos primeros picos de sobretensión de la figura 6.30

Se observa que la consideración de las capacidades derivación es fundamental para una correcta representación del transformador. Para profundizar más en cuáles de los fenómenos mostrados son debidos a las capacidades parásitas en solitario y cuáles son debidos a la interacción de las capacidades parásitas con la inductancia magnetizante del transformador, en el próximo apartado se analiza el comportamiento de una línea de transmisión finalizada solamente con las capacidades parásitas del transformador, lo cual es tanto como decir que el transformador es representado solamente mediante sus capacidades a tierra y entre arrollamientos.

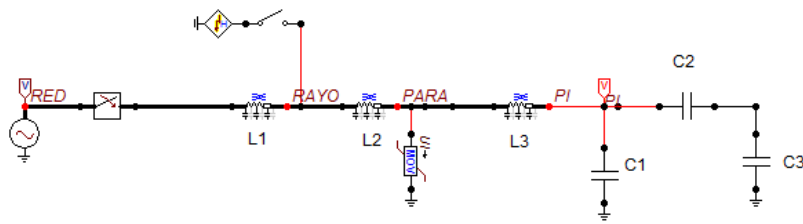
## **6.7 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON OTROS MODELOS SIMPLICADOS**

En el apartado anterior se ha obtenido la cuantía de las sobretensiones utilizando dos modelos diferentes de transformador disponibles en ATP. En este apartado se estudia la posibilidad de utilizar modelos simplificados para obtener la cuantía de las sobretensiones con un menor esfuerzo computacional.

### ***6.7.1. Simulación de un circuito compuesto sólo por capacidades***

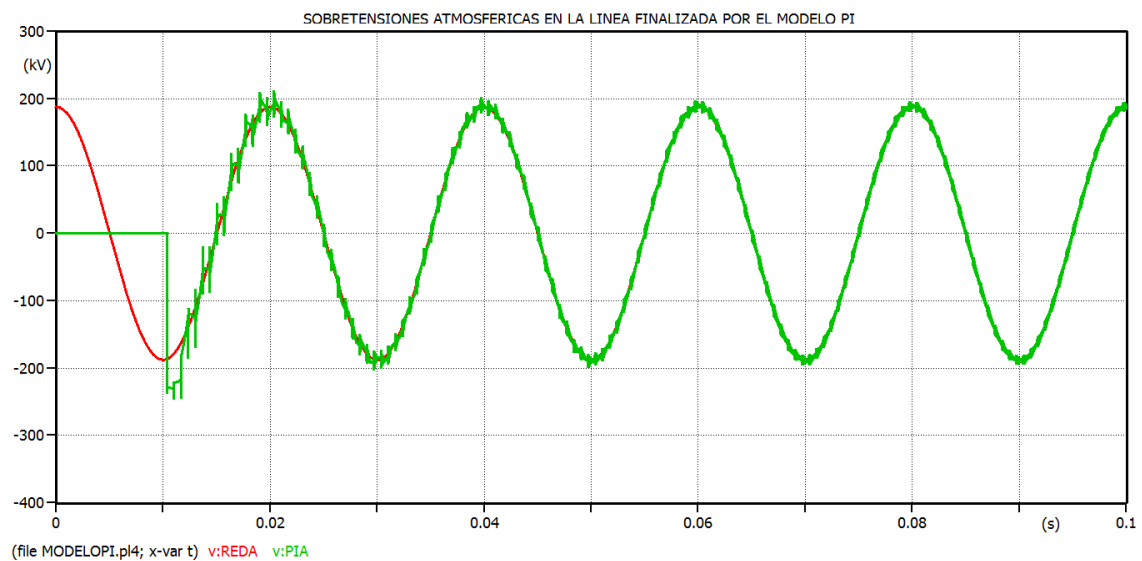
Como se indicó el transformador HYBRID de ATPDraw tiene en cuenta las capacidades parásitas existentes entre los arrollamientos del transformador (figura 6.30). Para comprobar el efecto de las capacidades sobre las sobretensiones que pueda sufrir el transformador se realizará una simulación teniendo en cuenta sólo dichas capacidades.

Para ello se recuerda el modelo que se introduce en ATPDraw en la figura 6.34:



**Figura 6.34:** Circuito implementado en ATPDraw para la comprobación del efecto de las capacidades parásitas en el diseño final

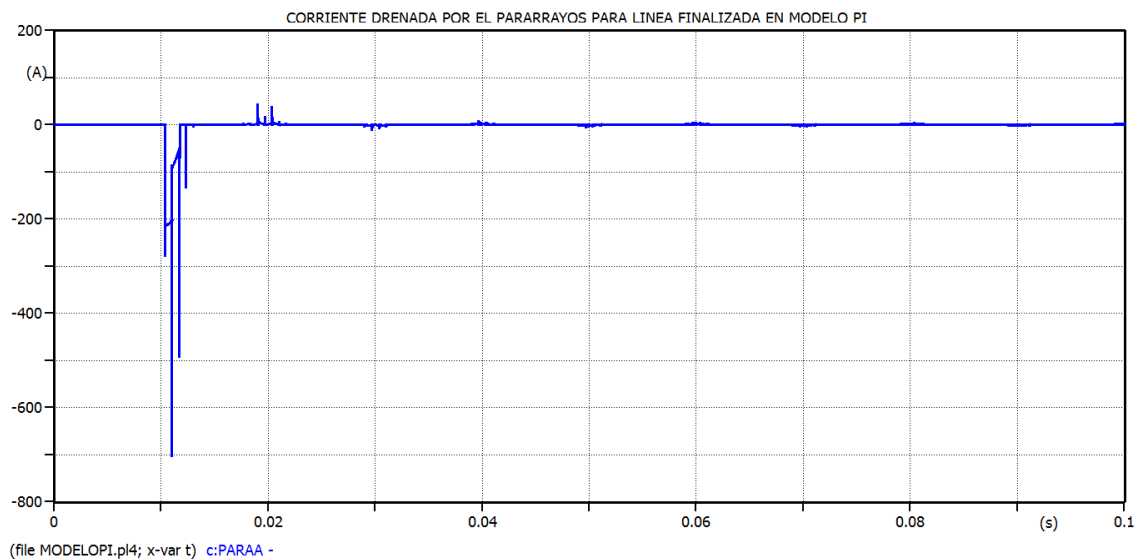
A continuación se incluye el resultado obtenido en la simulación del circuito de la figura 6.34 de las sobretensiones ante descarga atmosférica para la línea finalizada en modelo  $\pi$  en la figura 6.35.



**Figura 6.35:** Sobretensiones al final de la línea finalizada por el modelo de red  $\pi$  tras la inyección del rayo.

Onda roja: tensión de la fuente. Onda verde: sobretensión al final de la línea

En la figura 6.36 se muestra el resultado obtenido de la corriente que drena el pararrayos cuando la línea finaliza en un modelo  $\pi$ :



**Figura 6.36:** Corriente que drena el pararrayos en la línea finalizada por el modelo de red  $\pi$

En la tabla 6.7 se resume el valor del pico de sobretensión de la figura 6.35 tras aplicar zoom con a dicha figura:

Para d= 25m, en el instante 11.002 ms	
Valor de cresta de la tensión en la fuente	178,57 kV
Sobretensiones al final de la línea finalizada por modelo de red PI	244,1 kV

**Tabla 6.7:** Resultado de la máxima sobretensión obtenida tras la inyección del rayo a la línea finalizada por el modelo de red  $\pi$  protegida a 25m por pararrayos

El valor máximo de la corriente drenada por el pararrayos utilizando el modelo de red  $\pi$  es de 703,1 A, bastante semejante a la obtenida utilizando el modelo HYBRID.

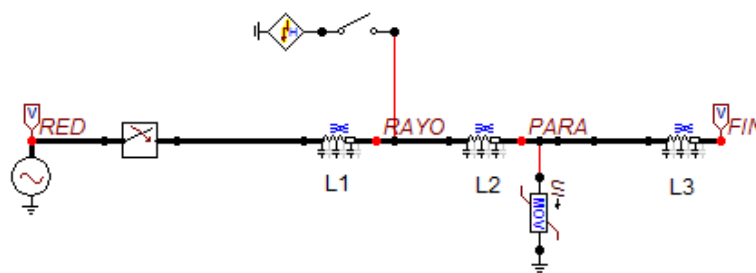
Observando las figuras 6.25, 6.30 y 6.35 se extraen las siguientes conclusiones:

- La cuantía del primer pico de sobretensión que alcanza al transformador depende casi exclusivamente de las capacidades, ya que es semejante en las figuras 6.30 y 6.35 (tabla 6.6 y 6.7).
- En esta nueva simulación los picos de sobretensión subsiguientes al primero son de mucha menor cuantía, lo que indica que la causa de estos picos son resonancias entre las capacidades parásitas y las inductancias del transformador.
- El amortiguamiento de la onda de sobretensión es ligeramente superior al del caso BCTRAN, y muy diferente al del caso HYBRID, lo cual muestra que las resonancias entre las capacidades parásitas y las inductancias del transformador son poco amortiguadas.

Como conclusión de lo anterior se puede decir que para representar correctamente el transformador ante sobretensiones de origen atmosférico es imprescindible tener en cuenta tanto las capacidades parásitas como las inductancias del mismo, si bien para una comprobación manual (sin utilizar un programa de simulación) de la máxima sobretensión que alcanza un transformador es posible representar el transformador por sus capacidades parásitas solamente.

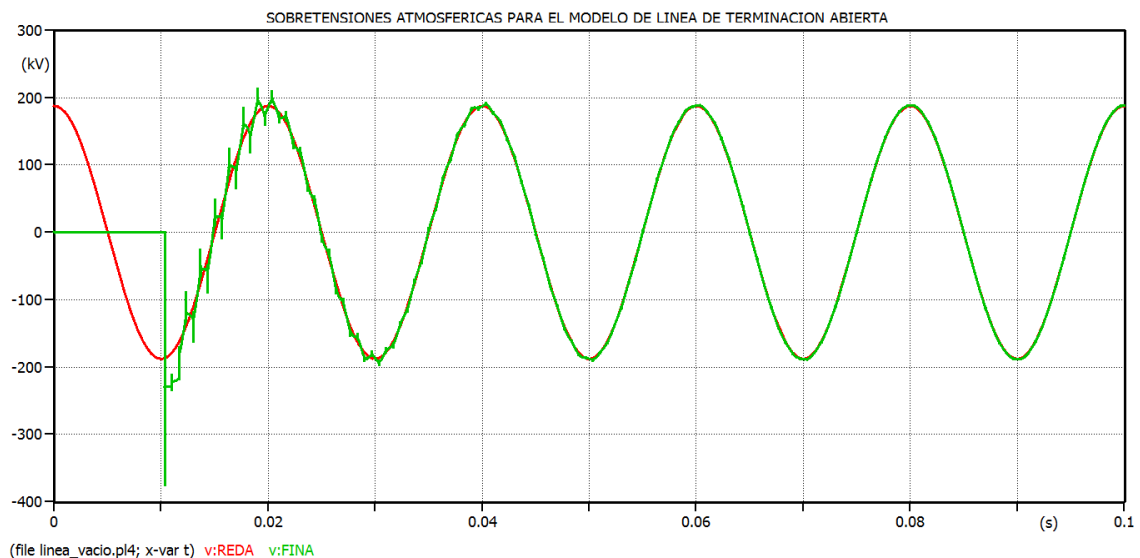
### **6.7.2. Simulación de una línea terminada en un extremo abierto**

Una simplificación más radical del modelo se obtiene sustituyendo el transformador por un circuito abierto, tal como se indicó en el capítulo 5 y se muestra en la figura 6.37:

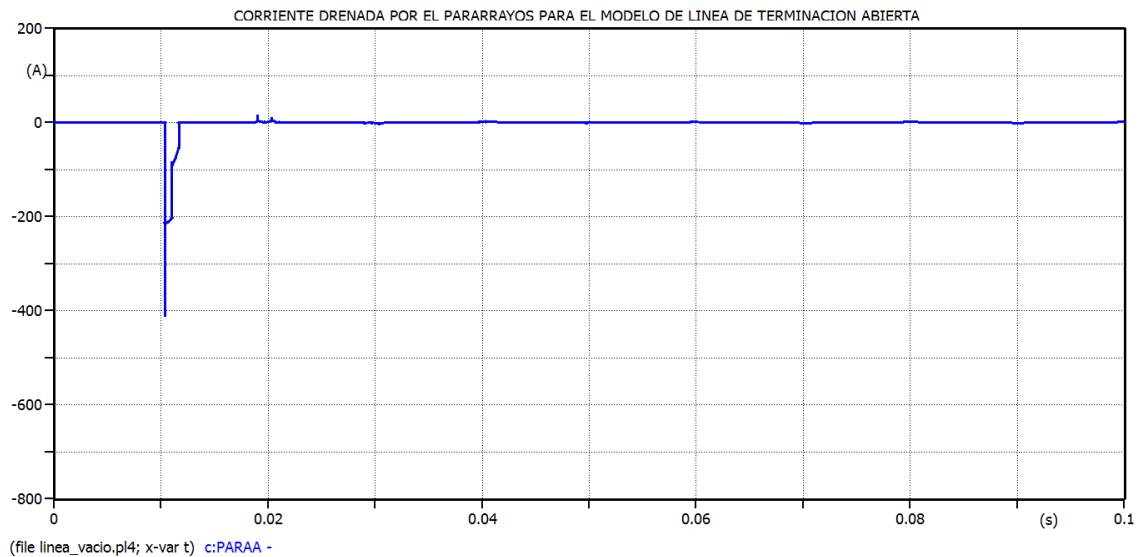


**Figura 6.37:** Circuito implementado en ATPDraw para la comparación del comportamiento del transformador como circuito abierto

Los resultados obtenidos en esta simulación se pueden observar en las figuras 6.38 y 6.39:



**Figura 6.38:** Sobretensiones al final de la línea abierta tras la inyección del rayo.  
Onda roja: tensión de la fuente. Onda verde: sobretensión al final de la línea



**Figura 6.39:** Corriente drenada por el pararrayos para el modelo de línea de terminación abierta

En la tabla 6.8 se resumen el valor del máximo pico de sobretensión alcanzado en la figura 6.38:

Para d= 25m, en el instante 10,33 ms	
Valor de cresta de la tensión en la fuente	186,76 kV
Sobretensiones al final de la línea de terminación abierta	374,84 kV

**Tabla 6.8:** Resultado de la máxima sobretensión obtenida tras la inyección del rayo a la línea de extremo abierto, protegida a 25m por pararrayos

Si se hace zoom a la figura 6.39 se puede visualizar que el pico de corriente que drena el pararrayos para esta simulación alcanza 409,8 A.

- La cuantía de sobretensión que se alcanza con este modelo es muy semejante a la obtenida para el modelo de línea finalizada por transformador BCTRAN.
- La corriente que drena el pararrayos según la figura 6.39 es también más reducida que la que puede visualizarse 6.36, asemejándose también a la drenada por el modelo de línea finalizada en transformador BCTRAN.

### 6.7.3. Conclusión de los resultados obtenidos

Con la realización de las simulaciones de una línea finalizada en el modelo de capacidades en  $\pi$  y con la simulación de una línea cuya terminación está a circuito abierto se puede llegar a la conclusión de que existe una semejanza de resultados entre el primer modelo con el modelo de línea finalizada en transformador HYBRID, y el segundo modelo con el de línea finalizada con transformador BCTAN. Estas semejanzas entre modelos se exponen en las tablas 6.9 y 6.10.

En la tabla 6.9 se puede visualizar la similitud de los resultados entre el modelo de línea finalizada por transformador híbrido con el modelo de línea finalizada en red  $\pi$

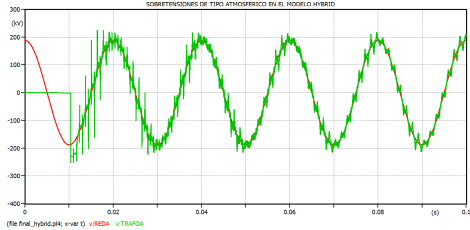
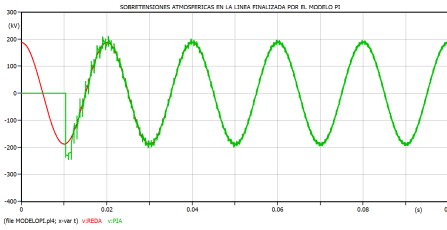
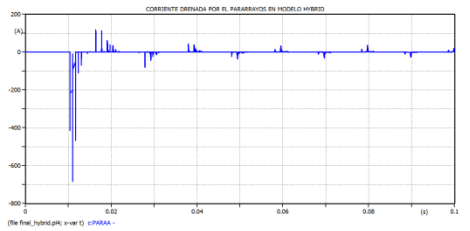
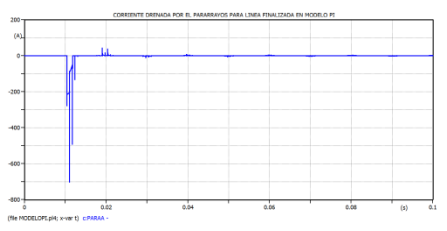
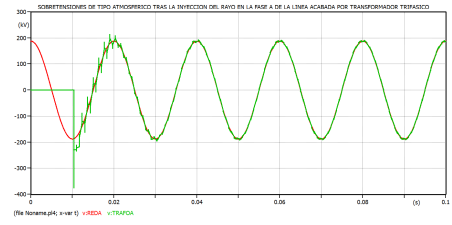
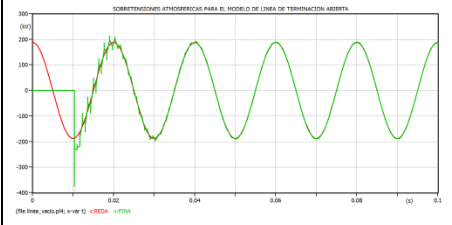
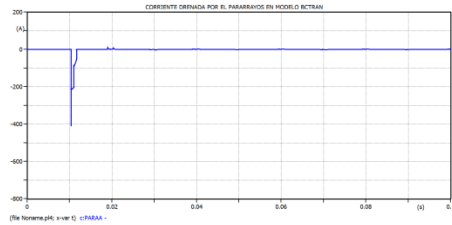
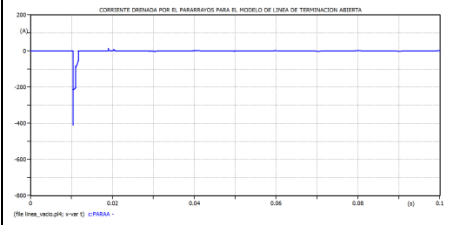
	MODELO DE TRANSFORMADOR	MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE
	HYBRID	Circuito de modelo de capacidades o modelo de red $\pi$
Máxima sobretensión al final de la línea	251,72 kV	244,1 kV
Comparación de la simulación obtenida para las sobretensiones en el modelo		
Corriente drenada por el pararrayos	690 A	703,3 A
Comparación de la simulación obtenida para la corriente que drena el pararrayos en el modelo		

Tabla 6.9: Similitud de resultados entre el modelo HYBRID y el modelo de capacidades

En la tabla 6.10 se visualiza la similitud de resultados entre el modelo de línea finalizada por transformador trifásico con el modelo de la línea terminada en circuito abierto:

	MODELO DE TRANSFORMADOR	MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE
	BCTRAN	Línea terminada en un extremo abierto
Máxima sobretensión al final de la línea	374,7 kV	374,88 kV
Comparación de la simulación obtenida para las sobretensiones en el modelo		
Corriente drenada por el pararrayos	409,6 A	409,8 A
Comparación de la simulación obtenida para la corriente que drena el pararrayos en el modelo		

**Tabla 6.10:** Similitud de resultados entre el modelo BCTRAN y el modelo de línea terminada en un extremo abierto

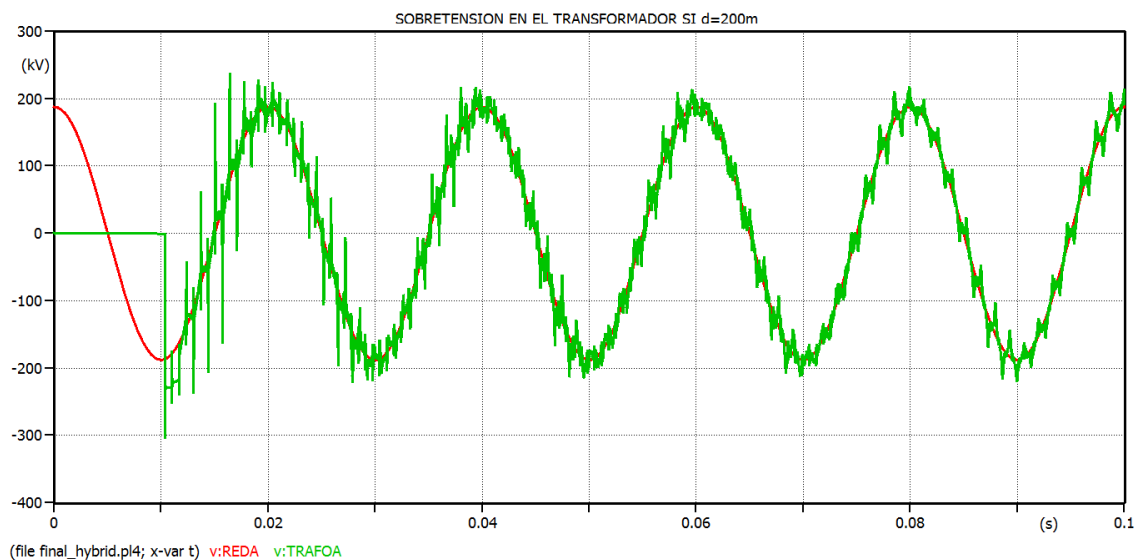
Como conclusión a estas similitudes puede decirse que en caso de que se quiera hacer un estudio manual de sobretensiones transitorias del problema podrán emplearse estos modelos más simplificados y menos explícitos los cuales aportarán una aproximación de las sobretensiones o compartimientos que podrá sufrir el transformador ante impulsos de origen atmosférico.

## **6.8 RESULTADOS DEL EFECTO DE LA DISTANCIA DEL PARARRAYOS AL TRANSFORMADOR**

Para el análisis del efecto de la distancia entre pararrayos y transformador se empleará el circuito de línea finalizada por transformador híbrido, que como se ha comprobado en apartados anteriores proporciona resultados más precisos para las simulaciones de sobretensiones de origen atmosférico.

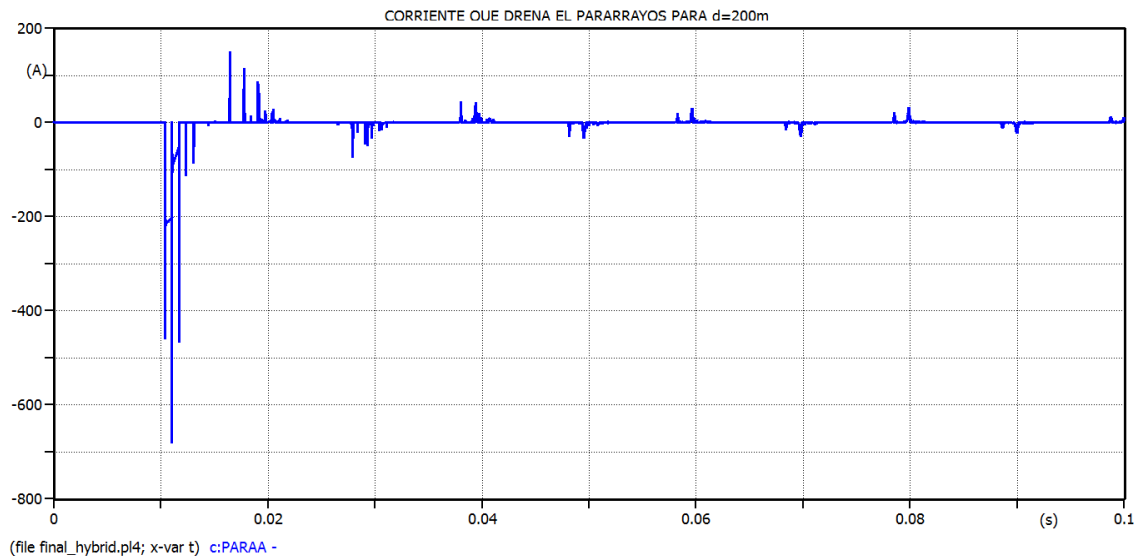
Como caso base se ha utilizado una distancia de 25 metros en las simulaciones anteriores entre el pararrayos y el transformador. A continuación se aumentará dicha distancia a 200 metros y posteriormente se disminuirá hasta colocarlo en bornes del transformador.

En la figura 6.40 se comprueba el efecto en las sobretensiones al aumentar la distancia entre pararrayos-transformador a 200m. En la figura 6.41 se muestra la corriente que drena el pararrayos cuando está situado a esta distancia del transformador.



**Figura 6.40:** Sobretensiones en el transformador para  $d=200\text{m}$ , siendo  $d$  la distancia entre el pararrayos y el transformador  
Onda verde: tensión en el transformador. Onda roja: tensión de la fuente.



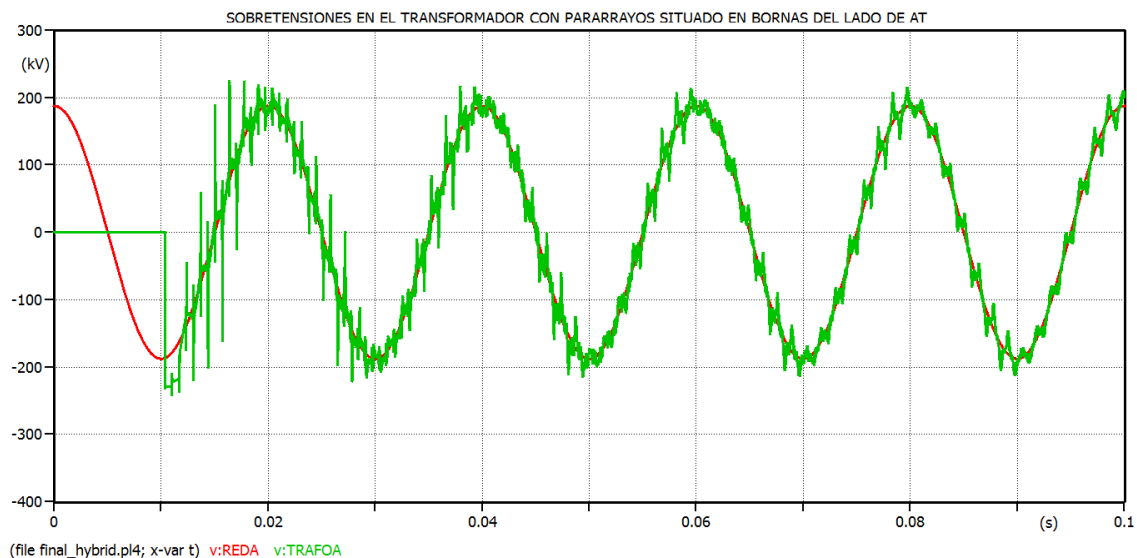


**Figura 6.41:** Corriente drenada por el pararrayos cuando se encuentra situado a 200m del transformador

Si se realiza un zoom al pico de tensión de la figura 6.40 se visualiza que el valor que se alcanza es de **302,65 kV** el cual se produce en el instante de tiempo de 10,338 ms. Al aumentar la distancia entre el pararrayos y el transformador aumenta la sobretensión en el transformador, como puede apreciarse si se compara con los resultados obtenidos en la figura 6.30, cuando la distancia pararrayos-transformador es de 25 metros.

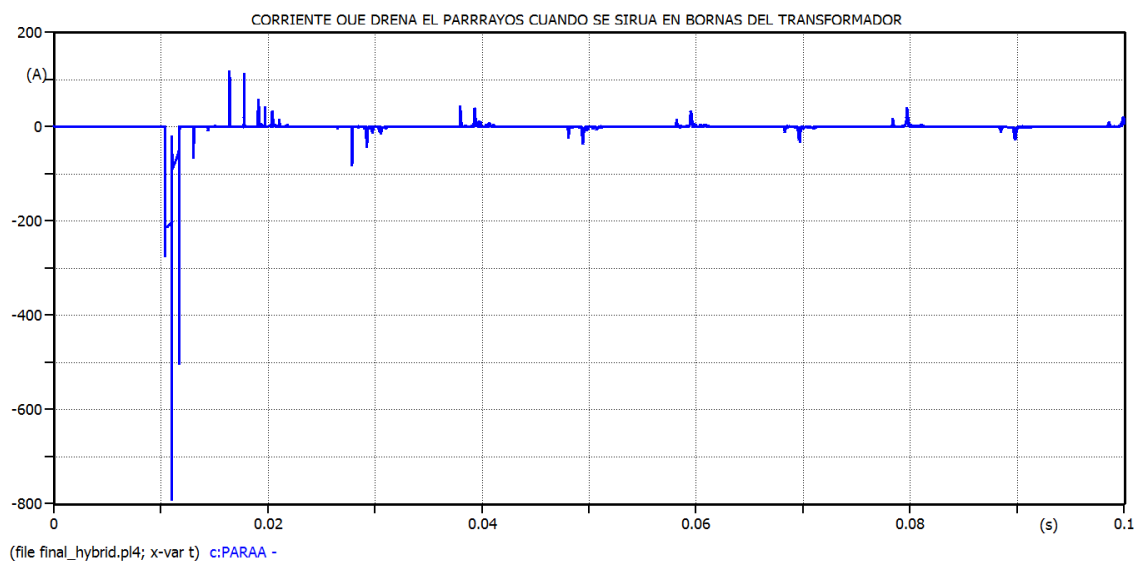
En la figura 6.41 la máxima corriente que drena el pararrayos es de 680,2 A mientras que cuando está colocado a 25 metros drena una corriente máxima de 690 A. Disminuye la corriente que drena el pararrayos, provocando un aumento de sobretensión en el transformador.

En la figura 6.42 se comprueba el efecto en las sobretensiones al colocar el pararrayos en bornas del transformador. En la figura 6.43 se muestra la corriente que drena el pararrayos para este mismo caso.



**Figura 6.42:** Sobretensiones en el transformador con pararrayos situado en bornas del lado de AT del transformador

Onda verde: tensión en el transformador. Onda roja: tensión de la fuente



**Figura 6.43:** Corriente drenada por el pararrayos cuando se encuentra situado en bornas del transformador

De la misma forma que en el apartado anterior, si se aplica zoom al mayor pico de tensión que soporta el transformador se puede comprobar que dicha sobretensión ha disminuido a **241,16kV** frente a los 302,65 kV que se han obtenido en la figura 6.40. De forma análoga, ante esta disminución de la sobretensión en el transformador el pararrayos drena una mayor corriente, alcanza el pico de corriente visible en la figura inferior 6.44 un valor de 790,3 A.

Uno de los objetivos de este TFG es comprobar que el nivel de protección que proporciona un pararrayos a un equipo eléctrico depende de la distancia entre ambos, de forma que cuanto mayor es la distancia entre el pararrayos y el equipo, menor es la protección. En la tabla 6.11 se resumen los valores máximos de sobretensión según la variación de la distancia entre el pararrayos y el transformador. Este resumen corresponde los valores máximos obtenidos en las figuras 6.41 (d=200m), 6.30 (d=25m) y 6.43 (en bornas):

<b>Resultados para d=200 m en t=10,338 ms</b>	
Tensión en la fuente	186,7 kV
Sobretensión en el transformador	<b>302,65 kV</b>
Corriente drenada por pararrayos	<b>680,2 A</b>
<b>Resultados para d=25 m en t=10,336 ms</b>	
Tensión en la fuente	186,7 kV
Sobretensión en el transformador	<b>251,72 kV</b>
Corriente drenada por pararrayos	<b>690 A</b>
<b>Resultados para pararrayos en bornas del transformador en t=11 ms</b>	
Tensión en la fuente	178,6 kV
Sobretensión en el transformador	<b>241,16 kV</b>
Corriente drenada por pararrayos	<b>790,3 A</b>

**Tabla 6.11:** Resultados obtenidos ante las distintas variaciones de la distancia entre el pararrayos y el transformador híbrido

Por otro lado, se aprovecha esta simulación para realizar un análisis entre el comportamiento del pararrayos ante sobretensiones de tipo maniobra y de tipo rayo. Si se recuerda el estudio correspondiente a las sobretensiones de tipo maniobra (presentado en el apartado 6.4), cuando el pararrayos también se sitúa en bornas del transformador, puede realizarse una comparativa de los resultados obtenidos en la simulación de dicho circuito con los que se acaban de obtener en las figuras 6.42 y 6.43 donde las sobretensiones son de tipo atmosféricas.

Para el caso de sobretensiones de frente lento (maniobra) el transformador alcanza una tensión de 229,39 kV frente a los 241,16 kV alcanzados en el estudio de sobretensiones de frente rápido (atmosféricas). Es evidente que una sobretensión de tipo atmosférica es más propensa a elevar la tensión del transformador y por lo tanto a provocar daños más graves pues tan solo con la inyección del rayo dimensionado durante 40 $\mu$ s alcanza sobretensiones más elevadas que las que pueden alcanzarse con la energización de la línea de transmisión. Además realizando este análisis vemos de forma notable la diferencia de la corriente que drena el pararrayos en cada caso. Cuando el pararrayos situado en bornas del transformador es sometido a una sobretensión de tipo maniobra drena una corriente de 213,8 A mientras que cuando es sometido a una sobretensión de tipo atmosférica casi cuadruplica la corriente que drena, 790,3 A. Esto supone un claro indicio de que la protección del transformador por pararrayos es mucho más necesaria ante sobretensiones de tipo rayo, como su buen nombre indica.

En la tabla 6.12 se resume la diferencia de los valores alcanzados ante sobretensiones de tipo maniobra y de tipo rayo cuando el pararrayos se encuentra situado en bornas del transformador:

<b>Resultados para sobretensiones tipo maniobra</b>	
Tensión en la fuente	186,7 kV
Sobretensión en el transformador	<b>229,39 kV</b>
Corriente drenada por pararrayos	<b>213,8 A</b>
<b>Resultados para sobretensiones tipo rayo</b>	
Tensión en la fuente	178,6 kV
Sobretensión en el transformador	<b>241,16 kV</b>
Corriente drenada por pararrayos	<b>790,3 A</b>

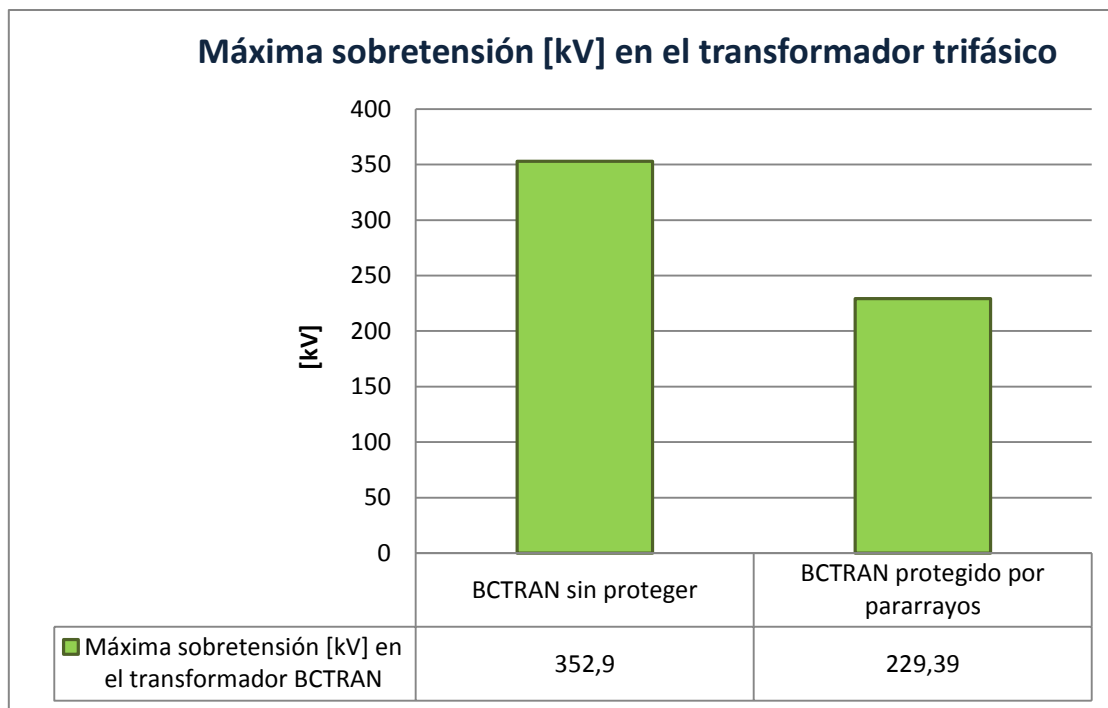
**Tabla 6.12:** Diferencia de las sobretensiones tipo maniobra vs tipo rayo cuando el pararrayos se encuentra situado en bornas del transformador

## **6.9 CONCLUSIONES GRÁFICAS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN ESTE CAPÍTULO**

En este apartado se representa de forma gráfica mediante diagramas de barras la diferencia de los resultados obtenidos para cada uno de los casos analizados en apartados anteriores.

Se comparan los resultados de los distintos casos o de las mejoras propuestas al sistema de una forma visual y más rápida con el fin de tener un enfoque más claro de los análisis realizados en dicho capítulo.

En la figura 6.44 se visualizan los resultados del máximo valor de pico de la onda de sobretensión en el transformador obtenidos tras la energización de la línea. Estos resultados corresponde a los de las simulaciones realizadas en los apartados 6.2 (energización de una línea larga finalizada por transformador trifásico) y 6.4 (energización de una línea larga finalizada por transformador trifásico protegido por pararrayos)

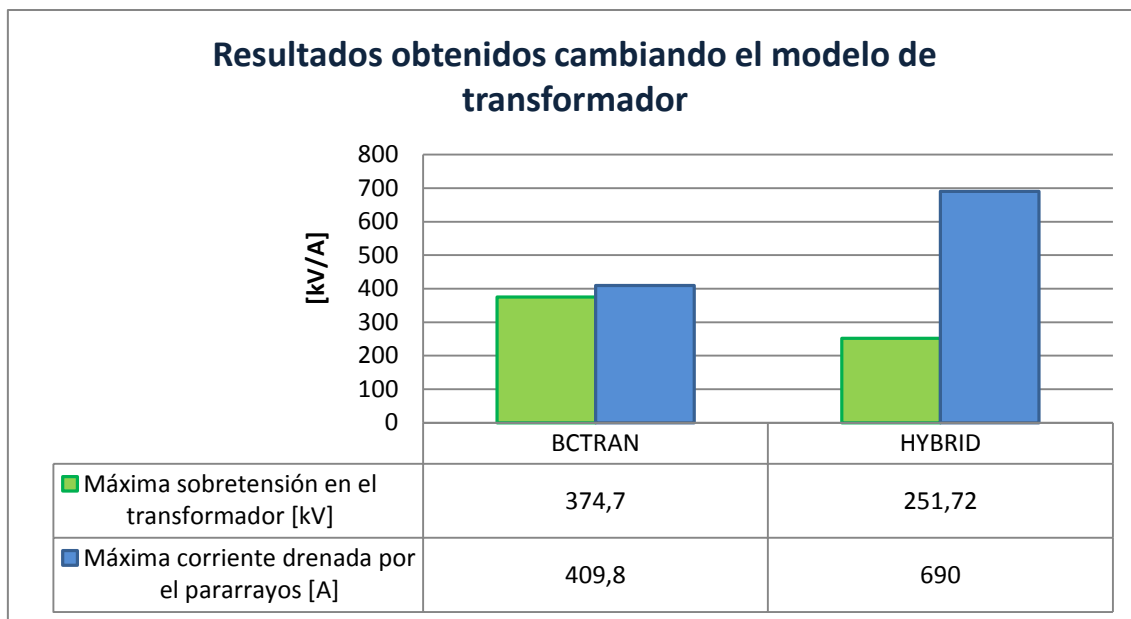


**Figura 6.44:** Comparación de sobretensiones obtenidas antes y después de proteger el transformador trifásico (BCTRAN) situado en el extremo de la línea de transmisión con el pararrayos

Al proteger el transformador por pararrayos disminuye el pico de sobretensión en el transformador tras realizar la maniobra.

A continuación en la figura 6.45 se analizan de forma visual los picos de tensión alcanzados y los picos de corriente drenada por el pararrayos tras someter a la línea de transmisión finalizada por transformador a fenómenos atmosféricos. Se comparan los resultados obtenidos en las simulaciones de los apartados 6.6.1. y 6.6.2 donde en el primero la terminación de la línea trataba un transformador trifásico mientras que el segundo dicha terminación trataba un transformador híbrido.

En la tabla 6.13 se resume por otro lado la conclusión en la cual evoca el apartado 6.7, donde tras la realización de una serie determinada de estudios de simulación de una línea finalizada por capacidades parásitas y de una línea de terminación abierta se estima cuál es el circuito simplificado correspondiente a cada uno de los sistemas citados anteriormente (figura 6.45)



**Figura 6.45:** Comparación de resultados de sobretensiones tipo atmosféricas con protección de pararrayos situado a 25 metros entre línea finalizada por transformador BCTAN o HYBRID

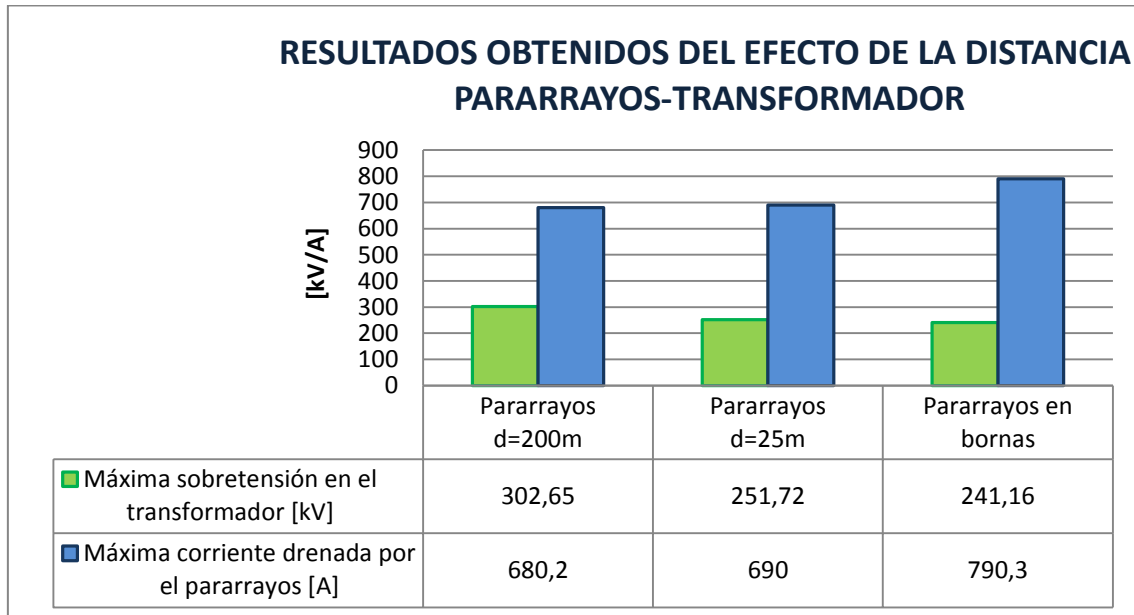
Como se puede visualizar en el gráfico, el transformador híbrido soporta un pico de sobretensión inferior al que soporta el transformador trifásico tras la caída del rayo en la línea, lo que inversamente conlleva a que el pico de corriente que drena el pararrayos situado en este transformador sea mayor. Esto es así ya que el transformador híbrido es el más idóneo para la simulación y estudio de sobretensiones de origen atmosférico (véase apartado 6.6)

Si quiere realizarse una estimación de las sobretensiones que pueda sufrir el transformador de una forma más rápida, no computacional o manual podrá emplearse como modelo equivalente de la línea finalizada por transformador trifásico el circuito equivalente de línea terminada en extremo abierto. De igual forma podrá emplearse el circuito de línea terminada en modelo de red  $\pi$  (o capacidades parásitas) si quiere simplificarse el circuito de línea finalizada por transformador híbrido. Esto queda resumido en la tabla 6.13:

Modelo inicial	Modelo equivalente
Línea finalizada por transformador trifásico	Línea terminada en un extremo abierto
Línea finalizada por transformador híbrido	Línea terminada en un modelo de red $\pi$

**Tabla 6.13:** Conclusión de modelos equivalentes para el circuito empleado en el estudio de sobretensiones de frente rápido

Por último, en la figura 6.46 se representan el efecto de la variación de la distancia pararrayos-transformador en las sobretensiones alcanzadas de origen atmosférico, así como la corriente drenada por el pararrayos tras este suceso. Esta figura supone un resumen visual del apartado 6.8.



**Figura 6.46:** Comparación de resultados de sobretensiones tipo atmosféricas según la variación de la distancia entre el pararrayos y el transformador híbrido

Se comprueba de forma rápida como a menor distancia entre el pararrayos y el transformador, mayor corriente drenada por el pararrayos y por tanto menor pico de tensión debe soportar el transformador.

# ***CAPÍTULO 7***

## **PRESUPUESTO**

---



## **7.1 PRESUPUESTO PARA UN ESTUDIO DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS**

En este apartado se muestra el presupuesto asociado a la realización de un estudio de transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión de nivel similar al expuesto en este Trabajo de Fin de Grado.

Como se puede ver en la figura 7.1 los costes incurren únicamente a las horas dedicadas a dicho trabajo. Se trata únicamente de las horas que le puede suponer a un experto el llevar a cabo este estudio, pues como se cita en el Capítulo 4 la licencia de ATP-EMTP es gratuita y por tanto no incurre en costes. En la casilla de costes informáticos durante 3 meses se consideran el coste y la amortización del equipo de trabajo para el tiempo de duración del estudio de transitorios, en este caso un ordenador.

Aunque este Trabajo de Fin de Grado es cuatrimestral se tiene en cuenta que los primeros meses son para el aprendizaje del ATP-EMTP, un simulador del cual se parte con desconocimiento. Se emplea el primer mes para el estudio y la recopilación de información para poder contrarrestar y verificar los primeros resultados de las simulaciones de partida.

Si consideramos que este trabajo es llevado a cabo por un experto o ingeniero junior la elaboración del estudio puede durar tres meses, aunque este tiempo podrá oscilar dependiendo de las dificultades que pueda presentar el estudio.

Este periodo de elaboración se puede desglosar en las siguientes etapas:

Una primera etapa de contacto con el cliente para conocer lo que realmente necesita y realizar recopilación de información por parte del ingeniero. Esta información puede tratarse a catálogos relativos a los distintos datos técnicos de los elementos eléctricos que configuran el sistema o datos que solicite el cliente, tales como valores de longitudes e impedancias de líneas, resistencias óhmicas de los conductos, resistencias internas de las fuentes, secciones, distancias entre los elementos, curvas características de conductividad del pararrayos o datos técnicos del transformadores.

Una segunda etapa de ejecución del modelo mediante la utilización del programa de análisis de transitorios ATP donde se dimensionen los circuitos a simular y se introduzcan los datos obtenidos en la primera etapa.

Por último, una tercera etapa de simulación y análisis de resultados, lo cual concluiría con adoptar la solución más eficiente para el estudio.

También se incluye la elaboración del informe final de conclusiones.

En la figura 7.1 se realiza el análisis de costes que puede incurrir la realización de un estudio de transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión de nivel similar al de este TFG:

Trabajo realizado	Tiempo estimado para la realización del trabajo [meses]	Días laborales/meses	Jornada laboral (horas/día)	Nº total de horas empleadas	Coste/hora [€/h]
Estudio de transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión	3	21	8	504	18,00 €
Coste del trabajo realizado	9.072,00 €				
Coste de Seguridad Social [35%]	3.175,20 €				
Costes informáticos durante 3 meses	28,33 €				
SUBTOTAL:	12.275,53 €				
IVA (21%)	2.577,86 €				
COSTE TOTAL:	14.853,39 €				

**Figura 7.1:** Estudio económico del proyecto de estudios de transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión

Aunque la realización de este estudio supone un coste de 14.853,39€ con él se consigue conocer el lugar estratégico donde la protección es más efectiva garantizando así que la configuración que se propone al cliente cumple con los niveles de protección y coeficientes de seguridad establecidos, lo cual a la larga supondrá un beneficio económico del sistema. Además se aparta también al cliente un modelo simplificado equivalente del circuito de estudio por si él mismo necesitase realizar una previsión más rápida de los efectos a los que estará sometido el transformador ante sobretensiones de frente lento o frente rápido.

# ***CAPÍTULO 8***

## **CONCLUSIONES**

---

## **8.1 RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO**

Los objetivos principales de este Trabajo de Fin de Grado son el aprendizaje de la herramienta de análisis de simulación de transitorios ATP y el poder realizar un estudio práctico de transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión, así como un análisis de la influencia de determinados factores en la elección del pararrayos.

Dichos objetivos se han logrado realizando un estudio previo de la herramienta de simulación ATP-EMTP. Cabe recordar que al inicio de este TFG tanto yo como mi tutor desconocíamos este programa y se empezó con él desde cero, instalando el programa (paso este que tampoco estuvo exento de dificultades).

Para coger agilidad con el interfaz ATPDraw se comenzó realizando circuitos sencillos como son la energización de una línea larga en vacío alimentada tanto por una fuente de corriente continua como por una fuente de corriente alterna. En algunos de estos circuitos se dispone de la solución al problema a través de libros de texto sobre el tema. Con estas simulaciones se ha conseguido tanto determinar los distintos factores que influyen en el diseño del pararrayos como diseñar el mejor circuito eléctrico que pueda mostrar el correcto funcionamiento del mismo, teniendo en cuenta la mayoría de los factores posibles (estudio entre los distintos tipos de fuentes de tensión, distintas resistencias internas de la fuente, distintos parámetros de la línea de transmisión...).

Un segundo paso es la energización de una línea trifásica finalizada por un transformador trifásico. Se estudian las sobretensiones tras esta energización y la variación de estos picos de tensión al variar las pérdidas del transformador. No quedándonos ahí, se indaga en un estudio de sobretensiones tipo maniobra cuando el transformador se encuentra protegido por un pararrayos. Para los estudios se han utilizado los datos de un transformador real obtenidos del protocolo de ensayos en fábrica del mismo.

Previo al análisis citado anteriormente se diseña y dimensiona el pararrayos, elemento que será de utilidad en simulaciones futuras tanto para el estudio de su efecto en sobretensiones de frente lento (maniobra) como su efecto ante sobretensiones de frente rápido (atmosféricas).

Con el diseño del pararrayos realizado y tras ser sometido a la prueba de baja frecuencia se protege el transformador situando dicho pararrayos en bornas de lado de AT. Con este estudio se realiza un análisis comparativo del efecto del pararrayos en la energización de una línea de transmisión trifásica finalizada por transformador trifásico.

Se procede después a un estudio de sobretensiones de frente rápido (también llamadas sobretensiones de origen atmosférico) donde en primer lugar se realiza el dimensionado del rayo. El rayo dimensionado es de 10kA, 8/20  $\mu$ s. Para los estudios futuros de este tipo de sobretensiones se inyecta el mismo rayo a la fase A de la línea durante un intervalo de tiempo de 40  $\mu$ s.

Para el caso del análisis de sobretensiones atmosféricas se ha realizado también un cambio en el tipo de transformador empleado, cambiando el transformador trifásico inicial (BCTRAN) por el transformador híbrido (HYBRID). El principal motivo de este cambio es que este tipo de transformador tiene en cuenta las capacidades parásitas a tierra y las existentes entre los distintos arrollamientos. La consideración de estas capacidades es muy importante en transitorios muy rápidos.

Con el diseño de estos nuevos circuitos, se realiza un primer estudio de la inyección del rayo en la línea cuando el pararrayos se encuentra a 25 metros del transformador y se estudian y comparan los resultados obtenidos de esta sobretensión cuando la línea finaliza en transformador trifásico o híbrido.

Con la finalidad de poder simplificar el análisis de las sobretensiones en el transformador tras impulsos atmosféricos y tener un menor esfuerzo computacional se presentan otros modelos simplificados que se asemejan a los citados anteriormente y que pueden emplearse para una estimación manual de las sobretensiones que puede alcanzar el sistema tipo.

Finalmente se realiza en este TFG un último estudio: el efecto en las sobretensiones de la distancia entre el pararrayos y el transformador. En este análisis se emplea el circuito eléctrico finalizado por transformador híbrido por ser el elegido en los estudios previos como el idóneo para dicho análisis. Se realizan simulaciones variando la distancia entre el pararrayos y el transformador y se verifica con el simulador ATP esta teoría citada por otros autores en sus libros.

## **8.2 CONCLUSIONES**

En este apartado se citan las conclusiones obtenidas tras los estudios presentes en el capítulo 5 con las simulaciones de los mismos representadas en el capítulo 6.

Este Trabajo de Fin de Grado cuenta con cuatro conclusiones que deben considerarse como las principales.

La primera de ellas trata la disminución de la sobretensión soportada por el transformador al colocar en su lado de AT un pararrayos. Esta conclusión puede verificarse comparando en el Capítulo 6 los resultados obtenidos en los apartados 6.2 y 6.4 donde al colocar el pararrayos la sobretensión desciende de 352,9 kV (transformador sin proteger) a 229,39 kV (transformador protegido).

Una segunda conclusión es la el uso de transformador híbrido para el estudio de sobretensiones de origen atmosférico frente al uso del transformador trifásico. Esta conclusión se verifica en el apartado 6.6 donde se compara el comportamiento de dichos modelos de transformador ante el mismo impulso tipo rayo. El transformador híbrido supone una mejora del diseño final ante este tipo de sucesos por tener en cuenta las capacidades parásitas presentes en sus más de un arrollamiento. Mientras que en el análisis de las sobretensiones tipo rayo con transformador híbrido las sobretensiones soportadas por el transformador trifásico son de 374,7 kV las soportadas por el híbrido desciende a 251,72 kV. Esta disminución

de la tensión conlleva a que con el modelo de transformador híbrido la corriente drenada por el pararrayos aumente a 690 A frente a 409,8 A para el caso de modelo de transformador trifásico.

La tercera conclusión es que podrá emplearse como modelo equivalente al modelo inicial de línea finalizada por transformador trifásico el modelo de línea terminada en extremo abierto. Así como el modelo equivalente de línea finalizada por transformador híbrido es el modelo de línea terminada en un modelo de red  $\pi$  o de capacidades. Se llega a dicha conclusión tras estudios realizados en el Capítulo 5 (5.8 Comparación con modelos más simplificados) y los resultados obtenidos en el Capítulo 6 (6.7 Comparación de los resultados obtenidos con otros modelos simplificados).

Finalmente una cuarta conclusión principal de este TFG es que a menor distancia entre el pararrayos y transformador menor es la sobretensión resultante en el mismo. Esto es acorde con lo indicado por otros autores tales como Martínez Velasco en su libro “Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión” (Velasco, 2007).

Unas conclusiones secundarias pero no con ello menos importantes corresponden a las obtenidas en los estudios simplificados que se realizaron al principio para coger agilidad y destreza con la herramienta de simulación ATP. En el estudio del efecto de la resistencia interna de la fuente en las sobretensiones alcanzas al final de la línea se comprueba que se puede reducir el valor de dicha sobretensión si se aumenta la resistencia interna de la fuente, pues a medida que se realiza dicho aumento se puede visualizar en las distintas gráficas obtenidas en las simulaciones como la onda de la tensión al final de la línea se amortigua de forma más rápida y alcanza un pico de valor inferior. Aunque esto también ocurre al aumentar la resistencia por unidad de longitud de la línea de transmisión, pero no de una forma tan rápida. También con las primeras simulaciones realizadas variando el instante de maniobra para línea alimentada por fuente de corriente alterna se concluye que se alcanza el mayor pico de sobretensión cuando se energiza la línea en el instante en el que la sinusoide de la onda de tensión de la fuente pasa por su cresta.

Todas estas conclusiones han sido contrarrestadas por autores especialistas en sus distintas obras, las cuales podrán encontrarse en la bibliografía de este trabajo.

### **8.3 SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS**

En este apartado se presentan sugerencias que podrían llevarse a cabo en trabajos futuros y que por falta de tiempo no han podido realizarse en este.

Se sugiere realizar un estudio del efecto que supone la resistencia de puesta a tierra en el transformador ante las sobretensiones tanto de tipo maniobra como de origen atmosférico. Esto se consigue conectando en los arrollamientos primario y secundario del transformador una resistencia a tierra. Deberá realizarse un estudio previo del valor de la resistencia de PAT a colocar en el diseño. Idem el efecto de la resistencia de puesta a tierra del pararrayos.

Otra sugerencia para trabajos futuros sería realizar un estudio del efecto de la variación de la pendiente del rayo ante sobretensiones atmosféricas y si ese estudio influye en la distancia más adecuada entre el transformador y el pararrayos, como afirman muchos autores (Velasco, 2007).

Se propone dimensionar un impulso tipo rayo, como se hizo en el apartado 5.6, con una nueva pendiente e inyectar dicho rayo en el sistema final, con la línea finalizada en el transformador híbrido. Una buena opción sería diseñar el rayo con el nuevo tipo de onda 10kA, 1/5  $\mu$ s, ya que podrán contrarrestarse los resultados obtenidos con los expuestos por (Velasco, 2007). Incluso para una mayor claridad en la comprensión de los conceptos cabría modelar la onda de sobreintensidad del rayo como una rampa de pendiente  $m$  seguida de un valor constante de la intensidad.

Otras posibilidades para trabajos futuros son profundizar en las razones por las cuales la sobretensión obtenida con el modelo de transformador trifásico, BCTRAN son diferentes a las obtenidas con el modelo híbrido, Hybrid; o investigar la influencia del tipo de modelo de línea en los resultados obtenidos. Para ello habría que cambiar el valor de las capacidades parásitas y de la inductancia magnetizante y observar la repercusión de estos cambios en las sobretensiones en bornas del transformador.

## **8.4 CONCLUSIONES PERSONALES**

Con la realización de este Trabajo de Fin de Grado cierro la etapa de mis estudios en el Grado de Ingeniería Eléctrica habiendo podido ampliar mis conocimientos técnicos adquiridos durante estos cuatro años.

Haber cogido experiencia con una valiosa herramienta de análisis de transitorios como es ATP-EMTP, empleada en distintos proyectos laborales, ha supuesto un aumento en mis capacidades de trabajo ingenieril.

Estoy segura de que el manejo de ATPDraw me será de gran ayuda para poder abrirme a nuevos Planes de Carrera, lo que sin duda es algo interesante para una joven profesional como yo.

Por otro lado, además de coger habilidad con ATP, he ampliado mis conocimientos en las distintas asignaturas cursadas durante mi carrera pero sobretodo en la asignatura de “Instalaciones Eléctricas”, ampliando mis conocimientos y habilidades en el estudio de transitorios.

Me siento muy orgullosa de haber cumplido los objetivos principales de este Trabajo de Fin de Grado y quedo a la espera de que también se pueda cumplir ese “sub-objetivo” propuesto por mi tutor Juan Carlos Burgos de poder incluir este trabajo en la enseñanza, por medio de prácticas con ATP en la asignatura de Instalaciones Eléctricas en cursos siguientes.



# ***BIBLIOGRAFÍA***

---

## **Bibliografía**

- Andrew.R.Hileman. (1999). *Insulation coordination for power systems*.
- ASINEL, G. D. (1979). Guía para la coordinación de aislamiento en líneas de alta tensión.
- Correa, L. C. (1995). Teoría y práctica con el ATP.
- DAS, J. (2010). *Transients in Electrical Systems*. McGraw Hill.
- Dawson, E. (2013). Seminario sobre transmisión de energía eléctrica . *Seminario sobre transmisión de energía eléctrica. Aspectos socio-ambientales de los proyectos de transmisión*.
- Electric, S. (15 de Septiembre de 2008). *Protecciones contra sobretensiones transitorias*. Recuperado el 2016, de Schneider Electric: <http://www.schneider-electric.es/es/>
- ENDESA. (2015). NORMA GE AND 015.
- Folch, R., Garrabou, J. M., & Ventura, A. M. (2012). *El transporte Eléctrico y su impacto ambiental* (1ª Edición. Asociación Española de Evaluación de Impacto Ambiental ed.).
- G.Fink, D., H.Wayne Beaty, & John M.Carroll. (1981). Standard Handbook for Electrical Engineers. *Manual práctico de electricidad para ingenieros, Edición en español*. (D. J. Liaño, Trad.) REVERTE S.A.
- Gómez, R. (s.f.). *SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA*. Recuperado el 2016, de 5. Puesta a Tierra de Protección Atmosférica: <http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe50.html>
- Greenwood, A. (1991). *Electrical Transients in Power Systems* (2ª Edición ed.).
- Group, C. a. (1982-92). *ATP Rule Book* .
- Hinrichsen, V. (Septiembre de 2011). *SIEMENS*. Recuperado el 2016, de Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/high-voltage-products/surge-arresters-limiters/>
- Kizilcay, D. M. (Enero de 2008). *Alternative Transients Program*. Recuperado el Febrero de 2016, de <http://www.emtp.org/>
- NORMA. (1999). Norma española UNE-EN 60071-2.
- NORMA. (2006). Norma Española UNE-EN-60071-1 (IEC 60071-1).
- Osorio, J. F. (2008). *Energía Hidroeléctrica*. PRENSAS UNIVERSITARIAS .
- Sánchez, C. Q. (2012). *Estudios del Fenómeno de Ferroresonancia en Transformadores*.

SIEMENS. (2014). *Power Engineering Guide* (Edition 7.1 ed.). Team.

Society, I. P. (1999 ). *IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination. Reaffirmed 2005.*

Stevenson, W. (1965). *Análisis de sistemas eléctricos de potencia* . Mc Graw Hill.

UNE-EN. (13 de Enero de 2013). Pararrayos. Parte 4: Pararrayos de óxido metálico sin explosores para sistemas de corriente alterna. *UNE-EN 60099-4:2005/A2:2010.*

UNE-EN60099-4. (23 de Noviembre de 2015). Pararrayos. Parte 4: Pararrayos de óxido metálico sin explosores para sistemas de corriente alterna. *UNE-EN 60099-4:200.*

Velasco, J. A. (2007). *Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión*. Mc Graw Hill.

# ***ANEXO***

## **REPORTE DE SOLUCIONES DE ATP-EMTP** **(Ejemplo de simulaciones significativas)**

---

ATP aporta un documento .atp donde se recogen los resultados obtenidos tras la compilación del determinado caso. Este archivo podrá guardarse en formato .txt

En este anexo a modo de ejemplo se incluyen únicamente los resultados obtenidos en las simulaciones del apartado 6.6. Esto corresponde a los casos de estudio de sobretensiones de origen atmosférico cuando el pararrayos se encuentra situado a 25 metros del transformador para cada uno de los modelos de transformador (6.6.1 y 6.6.2)

**REPORTE DE SOLUCIONES PARA EL MODELO DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO EN EL ESTUDIO  
DE SOBRETENSIONES ATMOSFÉRICAS (6.6.1)**

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW junio, miércoles 22, 2016
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2009
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>
C      2.E-8      .1
C      500      1      1      1      1      0      0      1
0
C      1      2      3      4      5      6
7      8
C
3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456
78901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
-1X0003ARAYOA      1050.  3.E8  5.E4 1 0
0
-2X0003BRAYOB      500.  3.E8  5.E4 1 0
0
-3X0003CRAYOC
0
-1PARAA TRAFOA      1050.  3.E8  25. 1 0
0
-2PARAB TRAFOB      500.  3.E8  25. 1 0
0
-3PARAC TRAFOC
0
$VINTAGE, 1,
1X0001A      92410.66283125
2X0001B      0.0
      92410.66283125
3X0001C      0.0
      0.0
      92410.66283125
      USE AR
1TRAFOA      6.3146321531593 .50538308954644
2X0001A      -20.45585065652      0.0
      66.268327151611 .04815947352627
3TRAFOB      0.0      0.0
      0.0      0.0
      6.3146321531593 .50538308954644
4X0001B      0.0      0.0
      -.0014476920645      0.0
      -20.45585065652      0.0
      66.268327151611 .04815947352627
5TRAFOC      0.0      0.0
      0.0      0.0
      0.0      0.0
      0.0      0.0
      6.3146321531593 .50538308954644

```

```

6X0001C                                0.0                0.0
                                -.0014476920645            0.0
                                0.0                0.0
                                -.0014476920645            0.0
                                -20.45585065652           0.0
                                66.268327151611 .04815947352627

$VINTAGE, -1,
  USE OLD
92PARAA                                5555.
3
                                2.66E5                -1.
1
                                10151.480391            26.068969997
0.53855623976
                                9999
-1RAYOA PARAA                        1050.  3.E8  5.E4  1  0
0
-2RAYOB PARAB                        500.  3.E8  5.E4  1  0
0
-3RAYOC PARAC
0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie  ><Vf/CLOP >< type  >
  REDA  X0003A      .01      1.E3
0
  REDB  X0003B      .01      1.E3
0
  REDC  X0003C      .01      1.E3
0
  XX0002RAYOA      .1      .10004
0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl.  >< Freq.  ><Phase/T0><  A1  ><  T1  ><
TSTART >< TSTOP  >
14REDA      187794.214      50.
-1.      1.E3
14REDB      187794.214      50.      -120.
-1.      1.E3
14REDC      187794.214      50.      -240.
-1.      1.E3
15XX0002-1      1.E4      8.E-6      2.E-5      2.
1.E3
/OUTPUT
  REDA  REDB  REDC  TRAFOA
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

**REPORTE DE SOLUCIONES PARA EL MODELO DE TRANSFORMADOR HÍBRIDO EN EL ESTUDIO DE SOBRETENSIONES ATMOSFÉRICAS (6.6.2)**

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW junio, miércoles 22, 2016
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2009
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>
C 2.E-8 .1
C 500 1 1 1 1 0 0 1
0
C 1 2 3 4 5 6
7 8
C
345678901234567890123456789012345678901234567890123456
78901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
-1X0007ARAYOA 1050. 3.E8 5.E4 1 0
0
-2X0007BRAYOB 500. 3.E8 5.E4 1 0
0
-3X0007CRAYOC
0
-1PARAA TRAFOA 1050. 3.E8 25. 1 0
0
-2PARAB TRAFOB 500. 3.E8 25. 1 0
0
-3PARAC TRAFOC
0
92PARAA 5555.
3
2.66E5 -1.
1
10151.480391 26.068969997
0.53855623976
9999
-1RAYOA PARAA 1050. 3.E8 5.E4 1 0
0
-2RAYOB PARAB 500. 3.E8 5.E4 1 0
0
-3RAYOC PARAC
0
C -----
-----
C Nonlinear core representation
C -----
-----
X0005AT0001A 1.51E5
X0005AT0001A 3.31E5
X0005BT0001B 1.51E5
X0005BT0001B 3.31E5

```



```

X0005CT0001C          1.51E5
X0005CT0001C          3.31E5
X0005A                1.E7
X0005B                1.E7
X0005C                1.E7
C -----
-----
C [R] matrix
C -----
-----
$VINTAGE, 1,
  TRAFOATRAFOX          0.50548888889
  TRAFOBTRAFOY          0.50548888889
  TRAFOCTRAFOZ          0.50548888889
  X0002AX0002X          0.04816955556
  X0002BX0002Y          0.04816955556
  X0002CX0002Z          0.04816955556
C -----
-----
C [A] matrix
C -----
-----
  USE AR
01TRAFOXXX0003          18.943898121          0.0
02X0002XXX0004          -20.455852431          0.0
                                66.265437454          0.0
03X0005AT0001A          -12.629265414          0.0
                                4.1771036517E-15          0.0
                                12.629265414          0.0
04TRAFOYXX0003          0.0          0.0
                                0.0          0.0
                                0.0          0.0
                                18.943898121          0.0
05X0002YXX0004          0.0          0.0
                                0.0          0.0
                                0.0          0.0
                                -20.455852431          0.0
                                66.265437454          0.0
06X0005BT0001B          0.0          0.0
                                0.0          0.0
                                0.0          0.0
                                -12.629265414          0.0
                                4.1771036517E-15          0.0
                                12.629265414          0.0
07TRAFOZXX0003          0.0          0.0
                                0.0          0.0
                                0.0          0.0
                                0.0          0.0
                                0.0          0.0
                                0.0          0.0
                                18.943898121          0.0
08X0002ZXX0004          0.0          0.0
                                0.0          0.0
                                0.0          0.0
                                0.0          0.0
                                0.0          0.0

```

	0.0	0.0
	-20.455852431	0.0
	66.265437454	0.0
09X0005CT0001C	0.0	0.0
	0.0	0.0
	0.0	0.0
	0.0	0.0
	0.0	0.0
	0.0	0.0
	-12.629265414	0.0
	4.1771036517E-15	0.0
	12.629265414	0.0
USE RL		
C -----		
-----		
C [C] matrix		
C -----		
-----		
C First half at the start of the windings		
01TRAFOA	1.E8	0.0
.011376		
02X0002A	0.0	0.0
-.00679		
	1.E8	0.0
.019679		
03TRAFOB	0.0	0.0
	0.0	0.0
	1.E8	0.0
.011376		
04X0002B	0.0	0.0
	0.0	0.0
	0.0	0.0
-.00679		
	1.E8	0.0
.019679		
05TRAFOC	0.0	0.0
	0.0	0.0
	0.0	0.0
	0.0	0.0
	1.E8	0.0
.011376		
06X0002C	0.0	0.0
	0.0	0.0
	0.0	0.0
	0.0	0.0
	0.0	0.0
-.00679		
	1.E8	0.0
.019679		
C Second half at the end of the windings		
01XX0003	1.E8	0.0
.011376		
02XX0004	0.0	0.0
-.00679		
	1.E8	0.0
.019679		

```

03XX0003          0.0          0.0
                  0.0          0.0
                  1.E8          0.0

.011376
04XX0004          0.0          0.0
                  0.0          0.0
                  0.0          0.0

-.00679
                  1.E8          0.0

.019679
05XX0003          0.0          0.0
                  0.0          0.0
                  0.0          0.0
                  0.0          0.0
                  1.E8          0.0

.011376
06XX0004          0.0          0.0
                  0.0          0.0
                  0.0          0.0
                  0.0          0.0
                  0.0          0.0

-.00679
                  1.E8          0.0

.019679
$VINTAGE, 0,
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  REDA  X0007A      .01      1.E3
0
  REDB  X0007B      .01      1.E3
0
  REDC  X0007C      .01      1.E3
0
  XX0001RAYOA      .1      .10004
0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 ><
TSTART >< TSTOP >
14REDA      187794.214      50.
-1.      1.E3
14REDB      187794.214      50.      -120.
-1.      1.E3
14REDC      187794.214      50.      -240.
-1.      1.E3
15XX0001-1      1.E4      8.E-6      2.E-5      2.
1.E3
/OUTPUT
  REDA  REDB  REDC  TRAFOA
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```